UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
Sede amministrativa del Dottorato di Ricerca

XX CICLO DEL
DOTTORATO DI RICERCA IN

METODOLOGIE DI BIOMONITORAGGIO DELLA ALTERAZIONE AMBIENTALE

MISURA DELLO STATO IDRICO DI *FRAXINUS ORNUS* L. QUALE BIOMONITOR DELL'ARIDITÀ AMBIENTALE IN SITI DIVERSI DEL CARSO TRIESTINO

(Settore scientifico-disciplinare: Fisiologia vegetale – BIO04)

DOTTORANDA
EMMANUELLE GORTAN

COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI
CHIAR.MO PROF. *MAURO TRETIACH*
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

RELATORE E TUTORE
CHIAR.MO PROF. *SEBASTIANO SALLEO*
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

CORRELATORE
DOTT. *ANDREA NARDINI*
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Indice

PARTE GENERALE

1 Il problema dell'aridità ambientale

Allo stato attuale, gran parte dei paesi dell'Europa centro-settentrionale (Archaux & Wolters 2006) e molti paesi del Bacino del Mediterraneo (Salleo & Nardini 2003) sono soggetti ad un impoverimento della vegetazione in generale e delle foreste in particolare, nonché ad una possibile tendenza verso la desertificazione. Tale degrado ambientale è in parte provocato dall'aumento della pressione antropica, dai frequenti incendi, dall'incremento dell'urbanizzazione indiscriminata, dal pascolamento intensivo e dall'inarrestabile disboscamento. A tutto ciò si vanno poi ad aggiungere gli effetti negativi dovuti a ricorrenti periodi di aridità (Rebetez et al. 2006). Inoltre assumono sicuramente importanza anche i fattori pedologici, geologici e geomorfologici quali la natura e la struttura del substrato, l'acclività della superficie e così via. Tutti questi fattori determinano nel suolo una ridotta disponibilità d'acqua per le piante e quindi una condizione di aridità ambientale. In particolare, nel Bacino del Mediterraneo l'aridità ambientale viene ancor più accentuata da fattori climatici poiché in corrispondenza del periodo estivo, alle scarse o assenti precipitazioni vengono associate elevate temperature. Il progressivo degrado ambientale contribuisce all'incremento di aree a rischio di desertificazione con conseguenze dal punto di vista ecologico, economico e socio-politico ed induce la riduzione della produttività biologica ed agricola. L'erosione del suolo, il deterioramento delle sue proprietà fisico-chimiche con conseguente perdita in biomassa vegetale, l'abbassarsi dei livelli di laghi e di corsi d'acqua nonché l'impoverimento economico delle popolazioni umane che occupano tali territori sono solo alcune delle conseguenze concrete ed evidenti di tale degrado. Tali effetti sono più marcati nelle regioni semiaride del Bacino del Mediterraneo, cioè la regione sudorientale della penisola iberica, l'intero Mezzogiorno italiano, la Sardegna, la Corsica, la Grecia e gran parte della Turchia meridionale e centrale.

Lo studio degli effetti dell'aridità ambientale a livello biologico si è concentrato prevalentemente sui biomi delle aree aride e semi-aride del Mediterraneo, in cui la carenza d'acqua rappresenta il principale fattore limitante

la produttività. Gli effetti dell'aridità sugli ecosistemi forestali sono invece ancora poco conosciuti. L'interesse della comunità scientifica su questo argomento è stato in parte ridestato dal verificarsi dell'aridità nell'estate 2003, che è stata eccezionalmente severa in molte regioni d'Europa sia per durata che per intensità (Rebetez et al. 2006). Si è trattato di un evento climatico estremo che ha causato serie conseguenze alla produttività delle foreste e alla sopravvivenza stessa di alcune specie vegetali meno competitive (Bréda et al. 2006). Nella zona dell'Europa che si estende dal sud-ovest della Francia fino all'area nord-orientale della Germania, tale aridità è stata ritenuta la più lunga e intensa che si sia mai registrata negli ultimi 50 anni: il deficit pluviometrico è durato per oltre 6 mesi ed è stato sempre associato a temperature molto elevate, oltre i 30-35°C.

Dal punto di vista scientifico, l'analisi del fenomeno dell'aridità ambientale e lo studio degli effetti ad esso associati sono di difficile interpretazione a causa della molteplicità degli strati nel sistema suolo-atmosfera interessati dai fenomeni di carenza idrica. Tutti i livelli di un ecosistema possono risentire delle condizioni di aridità ambientale: alla superficie del suolo, ne risentono la componente vegetale ed animale, mentre a livelli più profondi del suolo, la componente microbica e gli invertebrati edafici. Se ne deduce che l'aridità ambientale può avere serie conseguenze sul funzionamento di un ecosistema soprattutto per quanto riguarda la biodiversità, in quanto in tali condizioni le specie in grado di sviluppare strategie di resistenza, evitanza o tolleranza della condizione di stress hanno maggiori possibilità di sopravvivere. Una diminuzione della biodiversità corrisponde inizialmente ad un impoverimento della vegetazione relativamente reversibile ma successivamente ad alterazioni ambientali irreversibili almeno nei tempi di qualche generazione umana. A livello di ecosistema, tale situazione progredisce secondo un meccanismo di retroazione positiva, che tende ad alimentare i processi di desertificazione man mano che si riduce la produttività della componente biotica dell'ecosistema.

Quando l'evapotraspirazione supera determinati limiti, la disponibilità idrica può divenire insufficiente a sostenere i fabbisogni traspirazionali e fisiologici delle piante. L'effetto che tale situazione ha sulle piante si manifesta sotto forma di

stress idrico, a cui le piante reagiscono diminuendo gli scambi gassosi e riducendo di conseguenza la fissazione di CO_2 e quindi la crescita e la produttività. La disponibilità d'acqua più di ogni altro fattore ambientale è, infatti, determinante nella crescita annuale potenziale delle piante. Nelle foreste temperate ad esempio, le variazioni nella disponibilità d'acqua sono responsabili per l'80% della variabilità nelle dimensioni degli alberi (Bréda et al. 2006). E' noto che quando il potenziale dell'acqua del suolo (Ψ_{suolo}) scende a valori fortemente negativi come conseguenza del prosciugarsi del suolo durante un periodo arido, l'integrità del sistema idraulico xilematico che regola il trasporto dell'acqua nel continuum dal suolo alle foglie viene compromesso (Pockman & Sperry 2000). L'aumento progressivo della resistenza idraulica del suolo e della resistenza all'interfaccia suolo-radice limita infatti l'assorbimento dell'acqua. La situazione viene aggravata dal verificarsi di fenomeni cavitativi e di embolia all'interno dello xilema, che aumentano man mano che diminuisce il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}), riducendo ulteriormente il trasporto dell'acqua. Gli effetti sulla pianta si traducono in una notevole riduzione dell'area fogliare (e a volte avviene anche una prematura caduta delle foglie), che riduce la fissazione del carbonio anche dopo che il suolo è stato rifornito d'acqua e induce una riduzione nel tasso generale di crescita (Borghetti et al. 1998).

Gli studi finora intrapresi indicano che intensità (Frelich & Reich 1999; Shi et al. 2002), durata (Fay et al. 2000) e frequenza (Peterken & Mountford 1996) di un periodo arido influiscono notevolmente sugli ecosistemi forestali. In particolare, è la durata di un periodo arido piuttosto che la sua intensità che riveste un ruolo importante, soprattutto se all'aridità si associano temperature elevate, che amplificano lo stress ambientale (Bassow et al. 1994). Numerosi studi di fisiologia del bilancio idrico delle piante, già a partire dagli anni '80, indicavano chiaramente come episodi di aridità estiva, anche di breve durata, abbiano un impatto cruciale sulla crescita delle specie vegetali e sulla produttività delle foreste (Cruiziat et al. 2002). La durata del periodo di stress, quindi, fornisce un'importante dimensione della pressione ambientale complessiva. Nei periodi di maggiore aridità si evidenziano spesso nelle singole specie vegetali cadute di potenziale dell'acqua

della foglia (Ψ_{foglia}) oltre il punto di perdita di turgore e in alcuni casi, tali cadute non vengono recuperate neppure durante la notte. E' proprio la durata dello stress, quindi, la principale responsabile di strain plastici (Salleo & Lo Gullo 1985) e una delle cause principali della limitazione dell'accrescimento. Maggiore è inoltre il tempo in cui gli organi vegetali vengono mantenuti a bassi valori di potenziale dell'acqua (Ψ), maggiore è, come già accennato, la probabilità che si verifichi un'estesa embolia dei vasi xilematici (Nilsen & Orcutt 1996).

I danni indotti dal verificarsi di periodi di aridità portano certamente ad una disfunzione degli organi vegetali, ma raramente essi inducono un diretto e immediato declino della pianta e conseguentemente la mortalità (Bréda et al. 2006). Tyree e Zimmermann (2002) sostengono che è difficile stabilire che l'embolia xilematica (misurata in termini di perdita percentuale di conduttività idraulica) abbia come conseguenza la morte della pianta. Tuttavia, numerosi studi eseguiti in Francia nell'ambito del progetto pan-europeo “ICP-Forests/EU, Level 1” hanno registrato nel 2004, ossia nell'anno successivo all'eccezionale aridità del 2003, un diffuso e cospicuo aumento del tasso di mortalità di specie vegetali: dallo 0.2% allo 0.5% nelle foreste di latifoglie e del 1.2% nelle foreste a conifere (Renaud & Nageleisen 2005). In genere, nel breve termine gli stomi sono in grado di controllare il flusso traspiratorio così da renderlo compatibile con l'efficienza del trasporto di acqua nella fase liquida, prevenendo così un'estesa embolia xilematica (Jones & Sutherland 1991). Ad esempio, durante l'estate del 2003 la chiusura stomatica, che rappresenta un processo dinamico e reversibile di protezione attiva del sistema idraulico xilematico, è risultata efficace per quanto riguarda *Fagus sylvatica* L., che ha mostrato una limitata embolia xilematica. Per altre specie vegetali però, la protezione degli stomi è stata insufficiente a prevenire la caduta del potenziale dell'acqua verso il punto del potenziale in cui viene indotta cavitazione. In tali condizioni, solamente le specie maggiormente resistenti alla cavitazione hanno potuto sopravvivere. E' noto, infatti, che la resistenza alla cavitazione xilematica è uno dei più importanti caratteri funzionali che determinano il grado di resistenza di una specie vegetale allo stress idrico da aridità (Cruiziat et al. 2002).

In molti studi sul declino delle foreste è stata osservata una stretta correlazione tra il verificarsi di un periodo arido e la mortalità di alcuni individui, con una diversa incidenza in relazione alle diverse specie vegetali (Mueller et al. 2005). Ciò che manca tuttora è un approccio deterministico volto a comprendere i meccanismi che regolano questa correlazione. Sulla base di alcune osservazioni relative alle specie *Cornus florida* e *Acer rubrum*, Wyckoff e Clark recentemente hanno avanzato l'ipotesi che la mortalità nelle specie arboree aumenti al diminuire del tasso di crescita (Wyckoff & Clark 2002). Alcuni individui, infatti, presentavano nei cinque anni precedenti la loro morte un più basso tasso di crescita e minori dimensioni rispetto agli individui che sono sopravvissuti. Gli autori attribuivano così una riduzione del tasso di crescita ad una disfunzione nell'assimilazione del carbonio, mentre ritenevano molto probabile che la mortalità fosse causata da un esaurimento delle riserve immagazzinate. Martinez-Vilalta et al. (2002) osservò che in seguito ad una severa aridità verificatasi in Spagna nel 1994, *Quercux ilex* L. subì un tasso di mortalità superiore all'80%, mentre *Phyllirea latifolia* riuscì a sopravvivere. Tenendo conto della morfologia dell'apparato radicale, del flusso xilematico e del potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}), Martinez-Vilalta e collaboratori proposero un modello predittivo del rischio di mortalità di specie vegetali basato sul calcolo della perdita in percentuale di conduttività, che ha come conseguenza una riduzione dell'area fogliare. Secondo questo modello la mortalità di una pianta è principalmente controllata dal processo di assimilazione del carbonio: quando la pianta perde completamente la capacità di trasportare acqua a causa di un diffuso stato di embolia xilematica, essa non è più in grado di acquisire carbonio e se la situazione persevera, allora essa non può più sopravvivere. Tale teoria riveste una considerevole importanza se si pensa che un deficit di riserve nutritive immagazzinate può essere asintomatica nella pianta al momento del verificarsi del periodo avverso e può durare per molti anni dopo che si è verificato un evento di stress da aridità, con conseguenze assai negative sulla salute della pianta. Ad esempio, nella primavera del 2004 è stato osservato un più alto tasso di mortalità di germogli e di interi rami in varie specie di querce che, alla fine della stagione di crescita del 2003, risultavano essere caratterizzate da un

più basso contenuto di amido. Queste osservazioni mettono in evidenza un certo indebolimento nella vitalità di questi alberi ancora l'anno successivo ad un evento arido.

2 Le previsioni di un'estensione del problema dell'aridità

Le recenti analisi climatiche dimostrano come in Europa, negli ultimi dieci anni, si sia instaurata una condizione di aridità associata alle alte temperature nel periodo estivo (Fink et al. 2004; Pal et al. 2004; Rebetez 2001; Schaer et al. 2004). Studi dettagliati sul clima del 2003 hanno evidenziato come nel prossimo futuro, in particolare nelle regioni dell'Europa centro-occidentale, ci si aspetta che durante il periodo estivo il numero di giorni con temperature superiori ai 30°C ed il numero di giorni secchi saranno in aumento (Fink et al. 2004; Schaer et al. 2004). Ecologi e fisiologi ritengono quindi che l'aridità del 2003 non debba essere considerata un caso isolato, ma piuttosto un evento che potrà ripetersi con sempre maggior frequenza ed intensità (IPCC 2001).

Come è già stato accennato, l'impatto di un periodo di aridità può protrarsi anche molto tempo dopo l'evento in sé (Bréda et al. 2006). Frequenti, intensi e duraturi periodi di aridità potranno quindi lasciare le foreste in condizioni di stress cronico (Rebetez & Dobbertin 2004). Gli effetti principali sul breve termine (qualche anno) e sul medio termine (una decina d'anni) di tali eventi sulle specie vegetali sono una progressiva diminuzione della produttività (dovuta ad una persistente riduzione nella crescita) ed un incremento del rischio di mortalità. Una specie vegetale, già indebolita in seguito ad uno stress da aridità, esposta ad un ulteriore periodo di aridità potrebbe morire senza sintomi evidenti oppure diventare vulnerabile ad attacchi provocati da insetti (Rouault et al. 2006), funghi e agenti patogeni (Desprez-Loustau et al. 2006) come conseguenza di una minore produzione di tannini e alcaloidi (metaboliti secondari generalmente coinvolti nei processi di difesa da agenti patogeni). L'impatto di questi attacchi su specie vegetali già in condizioni di stress può determinare un ulteriore incremento del tasso di mortalità (Ayres & Lombardero 2000; Desprez-Loustau et al. 2006).

Recentemente, alcuni studi che si sono per lo più concentrati su specie erbacee in habitat di prateria, hanno messo in evidenza le conseguenze di periodi di aridità sul medio termine. Ad esempio, in seguito ad una severa aridità in

diverse praterie è stato osservato che la produttività delle specie vegetali, che prima dell'evento era pressoché costante, ha cominciato ad oscillare ogni due anni per un totale di dieci anni (Haddad et al. 2002). Ad altre specie vegetali è venuta a mancare la capacità di rigenerarsi per una progressiva perdita della capacità di resilienza, ossia della possibilità di ritornare alla condizione iniziale dopo aver subito un disturbo (Lloret et al. 2004). Ciò è stato osservato su alcune specie erbacee esposte sperimentalmente ad un periodo di aridità in Gran Bretagna. Le specie che continuavano a crescere velocemente, e che quindi erano maggiormente resilienti, alla fine si erano rivelate più sensibili ai danni provocati dall'aridità rispetto alle specie che crescevano più lentamente (Mac Gillivray et al. 1995).

Gli studi finora intrapresi indicano che severe e ricorrenti aridità possono essere considerate i fattori determinanti nei processi di declino delle foreste e nell'incremento del tasso di mortalità di specie vegetali in Europa. Ne è un tipico esempio il declino delle querce in Europa centrale, a cui si assiste tuttora, che è avvenuto proprio in seguito a diversi estremi eventi aridi verificatisi in passato, di cui i più importanti sono quello del 1976 (Becker & Lévy 1982) e quello del periodo 1989-1991 (Thomas et al. 2002). Su lungo termine, ossia nell'arco di più decenni, ripetuti periodi di aridità possono influire notevolmente sulla distribuzione e abbondanza delle specie vegetali e avere l'effetto di generare sulla vegetazione nuove pressioni evolutive, a cui le specie vegetali devono adattarsi pena la potenziale estinzione. La diffusa mortalità che ne consegue, in tale contesto può essere quindi considerata come espressione di un processo di selezione sulla vegetazione in relazione all'aridità.

L'aumento dell'urbanizzazione dovuto al continuo incremento demografico su scala mondiale della popolazione e il complesso delle attività economiche che ne consegue possono direttamente o indirettamente aumentare il rischio di aridità ambientale. L'aumento demografico non deriva solamente dal maggior numero di nascite in aree urbane, ma anche da un continuo aumento nello spostamento delle persone dalle periferie rurali alla città (APAT 2006). Nei paesi industrializzati oggi oltre la metà della popolazione vive in aree urbane, con punte del 70-75% e

si prevede che entro il 2020 questa percentuale salga all'80%. Quindi l'”ecosistema urbano” tende ormai ad espandersi su aree sempre più ampie (Blasi et al. 1995). I fenomeni di abbandono del territorio agricolo costituiscono una premessa per l'innesco di processi di degrado del suolo: quando precipitazioni brevi ed intense colpiscono terreni privi di copertura vegetale, l'impatto delle gocce di pioggia disgrega il suolo facilitando il dilavamento dello strato superficiale più ricco di materia organica. Tale situazione dà inizio ai fenomeni di erosione del suolo che favoriscono l'instaurarsi di potenziali processi di desertificazione.

In un centro abitato, l'acqua che proviene dalle precipitazioni meteoriche non va a costituire una riserva nel suolo (Blasi et al. 1995), in quanto scorre sulla superficie dei manufatti urbani, che hanno caratteristiche fisiche paragonabili a quelle della roccia nuda, e lungo le superfici stradali per poi essere rapidamente convogliata nella rete fognaria. Inoltre, l'espandersi dei centri abitati provoca un aumento del fabbisogno energetico e di conseguenza comporta lo sviluppo di infrastrutture, la costruzione di nuove vie di accesso e di comunicazione, la realizzazione di nuove zone industriali e di complessi residenziali. Avviene così un cambio di destinazione d'uso del suolo per cui molte superfici agricole presenti sul territorio vengono convertite in superfici cementate a favore di espansioni urbane di tipo residenziale e produttivo. Tale situazione determina un processo che genera frammenti spazialmente segregati e progressivamente isolati, inseriti in una matrice di origine antropica (APAT 2003a). Mediante la frammentazione si manifesta pertanto un meccanismo attraverso il quale una copertura omogenea (foresta, prateria) viene divisa in più parti isolate o addirittura rimossa (Farina 2001). Di conseguenza l'eterogeneità ambientale viene aumentata e ciò favorisce una distribuzione delle sue componenti in un tessuto a mosaico che può deprimere la connettività specie-specifica e impedire il libero movimento delle specie aumentandone l'isolamento, il rischio di estinzione e il degrado genetico.

Studi in alcune città centro-europee (Weber 1997; Pyšek 1998) hanno riscontrato un'elevata presenza di specie esotiche, rispetto all'atteso, che rappresentavano in media il 40% della flora totale. Questa differenza si può

spiegare con il concetto di “isola urbana di calore”. All'interno dei grandi agglomerati urbani, infatti, si determina un peculiare clima, noto come mesoclima urbano, per la bassa copertura vegetale, la bassa capacità termica del cemento e degli altri materiali edilizi, la produzione di calore dovuta al traffico automobilistico o alle attività industriali (Fanelli 2002). Quindi il mesoclima urbano gioca un ruolo importante sulla composizione della flora e sul livello di biodiversità, soprattutto sul contingente alloctono attraverso l'ingresso di specie estranee nelle flore locali.

3 Necessità di misure affidabili dell'impatto dell'aridità attuale e potenziale sulla vegetazione

Posto che l'aridità ambientale è certamente una pressione selettiva ampiamente sottostimata (Gutschick & BassiriRad 2003), è pertanto necessario comprendere in modo attendibile l'impatto che l'aridità ha sul funzionamento di un ecosistema e in che modo essa ne alteri le funzioni ecologiche e la composizione delle specie. Esiste quindi la necessità di delineare dei modelli funzionali in grado di quantificare l'intensità dello stress idrico sofferto dalla vegetazione. Identificare la interspecifica variabilità di risposta delle singole specie vegetali al variare del contenuto d'acqua nel suolo consente di individuare quei meccanismi di acclimatazione o adattamento implicati nei processi di evitanza, tolleranza e resistenza allo stress idrico da aridità. Tale obiettivo può essere conseguito attraverso lo sviluppo di programmi di monitoraggio prevalentemente sul lungo termine, ossia di durata almeno decennale, in modo da poter delineare dei trend di previsione degli effetti che futuri periodi di aridità potranno avere sulla biodiversità delle specie vegetali negli ecosistemi.

Visto l'elevato numero di variabili biotiche e abiotiche coinvolte, e l'impossibilità di ottenere misure precise per ognuna di esse, è necessario minimizzare i possibili errori dovuti a mancanza o imprecisione dei dati. L'attività di monitoraggio può essere programmata tenendo conto di possibili approcci integrativi a quello strettamente sperimentale, in modo da analizzare i complessi effetti dell'aridità sulla vegetazione. Le osservazioni in campo, ad esempio, ricoprono un ruolo di fondamentale importanza soprattutto nel rilevare gli effetti immediati e a breve termine dello stress idrico da aridità sulla vegetazione. L'attenzione dovrebbe essere focalizzata innanzitutto nell'identificare le specie maggiormente vulnerabili allo stress idrico da aridità perché, in seguito a possibili cambiamenti climatici, esse saranno probabilmente le prime ad essere seriamente minacciate nella loro sopravvivenza (Archaux & Wolters 2006). Poiché queste specie mostrano una grande sensibilità all'aridità, esse potrebbero essere importanti strumenti per il monitoraggio del degrado ambientale e perciò

utilizzabili come bioindicatori di campo in studi ecologici (ANPA 2001a).

Se il fenomeno dell'aridità colpisce fortemente vaste zone, risulta allora di fondamentale importanza poter quantificarne in modo affidabile il livello. A tale scopo, in anni recenti una notevole attenzione è stata dedicata allo sviluppo e alla standardizzazione di indici di aridità ambientale. La necessità di disporre di strumenti che favoriscano una migliore conoscenza della componente ambientale di un territorio ed una più precisa valutazione della vulnerabilità di questa all'aridità nasce dalla consapevolezza di quanto siano importanti tali aspetti per poter attuare una corretta pianificazione della gestione delle risorse ed impedire l'ulteriore aggravarsi delle problematiche ambientali in atto. L'esigenza di disporre di tecniche adeguate per identificare le aree maggiormente vulnerabili rappresenta quindi un punto fondamentale per lo sviluppo di programmi di conservazione e miglioramento delle foreste in Europa (APAT 2003b). Elaborare diverse metodologie per l'individuazione delle aree sensibili all'aridità richiede la messa a punto di procedure ed indicatori per il monitoraggio del fenomeno e di strumenti e tecniche idonee alla gestione di grandi quantità di dati ed all'analisi integrata delle informazioni (Trisorio Liuzzi & Ladisa 2001). Per analizzare l'evento arido verificatosi nel 2003, ad esempio, era disponibile una notevole quantità di informazione scientifica approfondita, ma questa conoscenza era piuttosto frammentaria e non soggetta alla necessaria sintesi (Bréda et al. 2006). Data la complessità della tematica di studio e nell'ottica di quanto finora evidenziato è necessario mettere a punto un modello, in un quadro organico e definito, oltre alle conoscenze di dettaglio relative all'impatto dell'aridità sulla vegetazione.

4 Metodi di apprezzamento dell'aridità

4.1 Uso di indici ecologici: problemi nella loro affidabilità

Per comprendere lo stato di alterazione ambientale di un territorio, l'approccio classico di tipo ecologico consiste nell'utilizzare gli indici sviluppati da Ellenberg (1974) e Landolt (1977). Ellenberg propose di sintetizzare mediante una scala numerica (da 1 a 9) il comportamento di ciascuna specie rispetto ai sei fattori ecologici considerati essenziali per la vita delle piante: L – radiazione luminosa; T – calore; C – continentalità del clima; U – umidità o disponibilità di acqua (per questo fattore sono stati aggiunti i valori supplementari 10-11-12 per indicare suoli inondati periodicamente o perennemente); R – reazione del suolo; N – nutrienti. Nel lavoro originale (Ellenberg 1974) venivano presentate per ciascuna specie indicazioni aggiuntive sulla salinità con una scala da 1 a 3 e sull'adattamento ai metalli pesanti. Ellenberg ha applicato questo sistema su circa 2000 specie vegetali della Germania e successivamente anche nella Polonia e nell'Ungheria. In Italia, il metodo elaborato da Ellenberg fu ampiamente utilizzato da Pignatti a partire dal 1993-94. Il sistema elaborato da Landolt (1977), che fu limitato alla flora svizzera, ricalca in generale quello di Ellenberg. Egli aggiunse altri due fattori ecologici rispetto a quelli di Ellenberg (H – humus; D – granulometria) e utilizzò una scala di numeri compresi tra 1 e 5. L'approccio innovativo di Ellenberg era basato sulla possibilità di utilizzare la grande quantità di dati raccolti sulla distribuzione geografica e topografica delle specie come metodo di bioindicazione nel senso che ogniqualvolta si osserva la presenza di una specie vegetale in un determinato sito, questa è la prova che il sito è compatibile con le sue esigenze ecologiche. Ogni specie vegetale ha infatti nei confronti di ciascun fattore ecologico un ambito di tolleranza entro il quale può svolgere le proprie funzioni vitali. Dalla presenza di una specie vegetale si possono dunque ricavare informazioni sulle caratteristiche ecologiche del sito stesso (Pignatti et al. 2005).

Uno dei limiti di questo metodo è costituito dal fatto che ogni dato

rappresenta un'approssimazione, in quanto per ciascuna specie e ciascun carattere vi è un campo di variabilità che va espresso in un solo numero. Molti dati sono discutibili e danno solo un'indicazione grossolana ed indiretta delle caratteristiche ambientali di un sito. È quindi inevitabile un certo margine di errore che può divenire assai grande quando le approssimazioni dei diversi fattori si sommano. Questi indici, tuttavia, possono fornire utili informazioni per interpretare l'influsso di diversi parametri ecologici sulle variazioni nella composizione della vegetazione (Catorci et al. 2006). L'approccio acquista maggiore affidabilità quando viene applicato su insiemi costituiti da un gran numero di dati, così da ottenere medie significative. I rilievi fitosociologici, eseguiti in zone con una certa omogeneità fisionomica della vegetazione, permettono di fare un elenco delle specie presenti alle quali viene assegnato un valore di copertura secondo la scala di Braun-Blanquet successivamente modificata da Pignatti (1952). Tali rilievi permettono così di analizzare e descrivere i tipi di vegetazione presenti in un dato territorio. In generale è necessario disporre di una tabella con almeno 10-20 rilievi fitosociologici, che comprende da 50 a 150 specie vegetali, ciascuna delle quali entra con la propria ciascuna delle quali entra con la propria frequenza percentuale oppure con la media dei valori di copertura (i due procedimenti danno risultati poco differenti) ed in questo caso le medie risultano attendibili (Pignatti et al. 2005).

L'ecosistema viene così analizzato mettendone in evidenza i singoli fattori, ciascuno dei quali può variare da un minimo ad un massimo e l'intensità di tali fattori viene espressa mediante una scala empirica. Con questa operazione il sistema viene scomposto nelle sue componenti: si perde informazione sulle relazioni che regolano il sistema, ma si acquista la possibilità di effettuare confronti e mettere in evidenza processi dinamici e linee tendenziali. Quando una pianta cresce in una comunità vegetale, può vegetare in condizioni che differiscono da quelle considerate come il suo optimum ecologico. Per tale motivo l'interpretazione dei valori di bioindicazione va fatta tendendo conto che le possibilità di crescita potrebbero essere influenzate da altri fattori, quali ad esempio la competizione tra individui. Ad esempio, in Francia *Bromus erectus*

Huds è una specie che non riesce ad espandersi nelle praterie a substrato calcareo perché in competizione con *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv., mentre domina in aree caratterizzate da elevata aridità per la quale quest'ultima specie dimostra una elevata vulnerabilità (Archaux & Wolters 2006).

L'uso degli indici ecologici non deve mai avvenire in maniera acritica: in particolare è sconsigliato utilizzare tali indici in aree che dal punto di vista del clima e della vegetazione sono molto diverse da quelle per cui essi sono stati originariamente elaborati (ANPA 2001b). Una possibile applicazione di tali indici su scala globale pone quindi un problema relativo ai valori di riferimento, per cui sarebbe necessario modificare le scale dei valori in modo che esse possano essere applicate dovunque.

I problemi relativi alla diversità specifica in relazione all'evoluzione strutturale, stabilità e maturità degli ecosistemi naturali sono di centrale importanza in ecologia. Il modo in cui gli individui sono ripartiti tra le specie in un determinato biotopo riflette il grado di organizzazione più o meno complesso di una comunità, e tale complessità, o diversità, rispecchia generalmente la stabilità di un ecosistema. Da un punto di vista applicativo le misure di biodiversità possono essere utilizzate con successo quali indicatori dello stato di salute delle comunità ecologiche e nell'ambito della conservazione ambientale si rivelano utili per controllare e prevenire la perdita del prezioso patrimonio genetico delle specie rare e in via di estinzione in ambiente terrestre (Ganis 1991). In particolare, l'aridità di un'area se protratta nel tempo, dà luogo ad un impoverimento nella biodiversità che può essere dunque considerata un utile parametro nella valutazione del degrado tendenziale di un'area.

La diversità specifica di un dato territorio è descritta tramite la ricchezza (numerosità delle specie presenti) e l'equitabilità (valore che esprime la quantità delle singole specie). La diversità specifica di una comunità cresce all'aumentare del numero di specie e della loro equitabilità: misurarla significa valutare entrambe queste componenti. A questo scopo sono stati proposti numerosi indici e funzioni che vengono in genere suddivisi in tre categorie (Feoli & Ganis 2005):

1. indici di ricchezza, che misurano essenzialmente il numero di specie in una precisa unità di campionamento;
2. indici di equitabilità, che misurano quanto i valori di abbondanza delle specie sono equidistribuiti;
3. indici di diversità, che combinano le due componenti sopra citate.

Poiché la diversità biologica include anche le differenze genetiche tra le singole specie, in quanto i cromosomi (e quindi i geni e il DNA) determinano univocamente ogni individuo ed ogni specie, per avere una corretta valutazione della diversità biologica bisognerebbe in realtà stimare la ricchezza dei geni presenti in una determinata zona. Tale approccio però non è attualmente perseguibile per il fatto che non si dispone delle mappe genetiche di tutte le specie esistenti. Per ovviare a ciò, è possibile ricorrere al conteggio delle specie presenti in un zona, che forniscono un valore indiretto della ricchezza genetica presente (più specie ci sono e più grande è il numero di geni presenti). Questo approccio, pur costituendo una soluzione praticabile, non sempre è perseguibile per il fatto che a volte un censimento completo delle specie è molto dispendioso in termini economici e temporali. Per tale motivo spesso si preferisce focalizzare l'analisi sul numero di taxa superiori presenti (a livello di genere e famiglia) che sono uno strumento indiretto per la stima del numero di specie. Alcuni studiosi stimano il valore della biodiversità in termini di ricchezza in ecosistemi presenti in una zona: questo è un livello di studio poco costoso, ma che porta a scarsa precisione nella misurazione della diversità biologica.

L'indice di ricchezza più semplice esistente è il numero di specie (S) presenti in una comunità: $S = \Sigma n_i$ dove n_i è l'ennesima specie. La ricchezza specifica così stimata è però strettamente dipendente dalle dimensioni del campionamento perché quanto più grande è l'area rilevata o il numero di individui esaminati, tanto più grande è il numero di specie riscontrato. Pertanto la comparazione di due aree di dimensioni differenti può portare a grossolani errori (Farina 2001). Per rendere comparabili i numeri di specie per campione generalmente si utilizzano indici di ricchezza indipendenti dalla dimensione del campione (e quindi dell'area). Essi si basano su una relazione funzionale tra il

numero di specie (S) e la grandezza del campione (N): R_1=S/N; R_2=S/√N ; R_3=(S-1)/lnN (Feoli & Ganis 2005). Poiché analizzare la ricchezza floristica non rappresenta una misura completamente esaustiva, in genere si ricorre piuttosto all'applicazione di indici di equitabilità e diversità.

La diversità è invece un indice sintetico che esprime il numero di specie, o di altre categorie presenti in un'area, e la distribuzione delle loro abbondanze relative (equitabilità). Tra le misure di diversità, che considerano sia la ricchezza sia l'equitabilità delle specie o delle categorie, le più utilizzate sono quelle basate sulla teoria dell'informazione, mediante la quale si valuta la probabilità che un certo evento si manifesti, ad esempio la presenza di una specie. Secondo Shannon (1948) l'informazione (I) che un dato evento si verifichi è legata alla sua probabilità (p): I = - log p. Se un evento si verifica spesso la sua probabilità tende a 1 e quindi fornisce poca informazione (I tende a 0), mentre se la probabilità è molto bassa l'informazione tende ad 1 e l'evento diventa molto importante. Applicando la formula di Shannon ad un grande numero di eventi (più specie) si ottiene l'indice dell'entropia di Shannon: $\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i)$ S rappresenta il numero di specie e p_i la probabilità che l'evento i si verifichi, cioè l'abbondanza relativa di una specie. L'indice varia da 0 quando è presente una sola specie, ad un valore massimo dipendente dal numero di specie presenti quando queste sono equamente distribuite. Gli indici di diversità sono spesso soggetti a critica proprio per la combinazione delle componenti di ricchezza ed equitabilità.

L'indice di Shannon ed altri similmente costruiti sono adeguati per quantificare la diversità delle specie, ma non forniscono indicazione alcuna sulla qualità di tale diversità. Non tutti gli organismi viventi svolgono un ruolo chiave negli ecosistemi: alcuni possono essere sostituiti senza modificare la catena trofica, altri invece occupano posizioni importanti per garantire il funzionamento dell'ecosistema e la sua stabilità. Alcune specie possono contribuire ad aumentare la biodiversità di un'area, agendo sulle altre specie e salvaguardandone la sopravvivenza. Ad esempio, le specie arboree di una

foresta sono un'importante risorsa per molti organismi sia vegetali, sia animali (uccelli nidificanti, piante epifite, parassiti, erbivori frugivori) e contribuiscono, quindi, ad incrementare la biodiversità dell'ambiente in cui si trovano, creando le condizioni ottimali per la presenza di altre specie (Grassi et al 2006). Un ulteriore inconveniente è che tali indici hanno il forte svantaggio di non fornire indicazioni circa la catena causale che lega uno specifico fenomeno avverso (ad esempio l'aridità) con la vulnerabilità ad esso di singole specie e perciò l'uso di tutti gli indici ecologici implica un'informazione meramente descrittiva e non suscettibile di suggerimenti circa i rimedi che possono essere apprestati per limitare o frenare il danno ambientale. Infine, va notato che gli indici ecologici essendo di tipo "sintetico" non possono fornire discriminazione alcuna fra singoli eventi avversi quando essi si presentano in combinazione tra loro. In effetti, l'aridità, ad esempio, può combinarsi con elevate temperature ed elevata irradianza, con carenza di nutrienti eccetera. Il problema principale però può essere uno o più di questi fattori: gli indici ecologici non forniscono quindi la possibilità di discriminare quale dei fattori avversi sia il più temibile.

4.2 Uso di metodi di telerilevamento: vantaggi ed inconvenienti

Il telerilevamento o "remote sensing" è un insieme di tecniche che permettono di svolgere studi sull'ambiente in regioni dello spettro elettromagnetico all'esterno del campo del visibile. Il telerilevamento da satellite viene ampiamente utilizzato da oltre trent'anni e costituisce un'importante metodologia multidisciplinare in grado di fornire informazioni qualitative e quantitative senza un contatto diretto della parte strumentale. Le attuali applicazioni del telerilevamento satellitare sono numerose e coprono diversi settori di ricerca. In particolare, è possibile: a) lo studio del suolo, ossia la costruzione di carte tematiche, il monitoraggio dei processi di desertificazione, la valutazione di impatto ambientale, la stima del rischio geologico, il monitoraggio dell'espansione urbana sul territorio; b) lo studio dell'atmosfera, attraverso osservazioni a fini meteorologici e previsioni climatiche; c) lo studio dell'idrosfera, con particolare attenzione all'inquinamento idrico e alla gestione delle risorse

ittiche e degli ecosistemi acquatici; d) lo studio della vegetazione per le applicazioni in campo agricolo e il monitoraggio di parametri ambientali a livello di vegetazione e foresta. Nel 2005 erano già più di 60 i satelliti operativi nel fornire informazioni relative all'osservazione della Terra. La metà di questi satelliti è equipaggiata con sensori dedicati all'osservazione della vegetazione con ampia capacità spettrale (CEOS – Committee on Earth observation satellites). Le motivazioni che hanno spinto la comunità scientifica verso l'adozione delle tecniche di telerilevamento da satellite sono la tempestività, la correttezza ed affidabilità dei dati ed infine il costo che risulta essere inferiore rispetto a quello del telerilevamento tramite immagini aeree. Dal loro utilizzo emergono però alcuni problemi relativi alla risoluzione spaziale, spettrale e temporale dei sensori. Negli ultimi dieci anni grazie allo sviluppo tecnologico sempre più sofisticato dei metodi di “remote sensing”, le tecniche di telerilevamento da satellite stanno contribuendo in misura crescente al monitoraggio dello stress idrico da aridità sofferto dalla vegetazione e dalle foreste sia su piccola che su larga scala.

Nello studio della vegetazione viene sfruttata la riflettanza R (λ) ossia la parte di energia dello spettro elettromagnetico che non viene assorbita o trasmessa ma viene riflessa dalla vegetazione. Questa energia riflessa costituisce una sorta di firma spettrale e grazie ad essa si possono ricavare i cosiddetti indici di vegetazione. Questi sono costituiti da una combinazione matematica dei valori di riflettanza misurati nelle varie bande e hanno lo scopo di enfatizzare le componenti caratteristiche della risposta spettrale della vegetazione. Tali indici sono impiegati in una vasta gamma di applicazioni, dalla classificazione e inventario del patrimonio agricolo e forestale alla previsione dei raccolti, dalla valutazione e monitoraggio degli stadi fenologici all'analisi del degrado ambientale (ad es. in seguito a danni derivati da infestazioni o da stress idrico). Tra i numerosi indici di vegetazione derivanti da combinazioni matematiche di bande spettrali proposti in letteratura alcuni sono particolarmente interessanti per la valutazione dell'alterazione nelle condizioni della vegetazione.

L'indice di vegetazione della differenza normalizzata (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), introdotto da Rouse et al. (1974), è quello usato più

comunemente e viene calcolato come il rapporto: NDVI = (NIR–RED)/(NIR+RED). L'indice usa la riflettanza del canale attorno a 0.66 µm (canale RED), che è correlata con l'assorbimento della luce da parte della clorofilla, e la riflettanza del canale dell'infrarosso vicino (NIR) attorno a 0.86 µm, legata alla struttura interna delle foglie. Generalmente la vegetazione sana è caratterizzata da un'alta riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR). Una specie vegetale in condizioni di stress produce meno clorofilla e quindi riflette maggiormente nel rosso (canale RED) apparendo clorotica rispetto ad una specie ricca di clorofilla che risulta particolarmente riflettente nella regione del verde, centrata attorno a 0.5 µm. In particolare, valori positivi di NDVI (alta riflettanza nel NIR e bassa nel RED) sono legati alle aree vegetate mentre valori negativi (RED maggiore di NIR) rappresentano specchi d'acqua, fiumi, torrenti e corsi d'acqua in generale, nubi o zone innevate. Valori attorno allo zero (NIR ≈ RED) rispecchiano generalmente condizioni di assenza di vegetazione quali il suolo nudo o la roccia affiorante (Lillesand & Kiefer 1994). L'NDVI, che è quindi correlato con la presenza di biomassa verde, è stato applicato in molti studi relativi a stime di raccolto in campo agricolo o di biomassa secca (Tucker & Sellers 1986), ma presenta alcune limitazioni. Esso risente delle condizioni atmosferiche e in particolare è sensibile agli effetti di scattering atmosferico (Holben 1986). Inoltre i due canali usati nell'indice sono diversamente sensibili alla sovrapposizione dei diversi strati di foglie: il canale dell'infrarosso vicino è sensibile fino a 8 strati fogliari, mentre il canale del rosso riesce ad apprezzarne solamente uno (Lillesaeter 1982) a causa del forte assorbimento della clorofilla attorno a 0.67 µm. Inoltre NDVI è sensibile all'effetto background del suolo (Huete 1987).

Per superare tali limitazioni, Bo-Cai Gao (1996) propose un nuovo indice di vegetazione: l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index). Tale indice è simile nella formula matematica all'indice NDVI, ma sfrutta due canali dell'infrarosso vicino centrati rispettivamente attorno a 0.86 µm e 1.24 µm. Entrambi i canali sono ugualmente sensibili alla sovrapposizione di strati fogliari. L'assorbimento dell'acqua dalla vegetazione attorno a 0.86 µm è trascurabile, mentre è presente anche se debolmente un assorbimento attorno a 1.24 µm.

L'indice NDWI rappresenta un'affidabile misura del contenuto d'acqua delle foglie ed è meno sensibile agli effetti di scattering rispetto all'indice NDVI, anche se non rimuove completamente gli effetti di riflettanza del suolo (similmente a NDVI). Poiché l'informazione sulla copertura della vegetazione contenuta nel canale 1.24 µm è molto diversa da quella contenuta nel canale del rosso attorno a 0.66 µm, l'indice NDWI è da considerarsi come un indice di vegetazione indipendente ma complementare all'indice NDVI per questo non sostitutivo di esso.

L'indice NDVI è usato comunemente per monitorare la vegetazione su scala continentale usando i dati forniti dai sensori VEGETATION, AVHRR, SeaWiFS, MERIS e MODIS. Il sensore VEGETATION montato a bordo del satellite SPOT- 4 della serie SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) è stato ampiamente utilizzato per analizzare in modo approfondito gli effetti a breve termine dell'eccezionale aridità verificatasi nel 2003. Attraverso l'elaborazione delle immagini telerilevate a Giugno, Luglio e Agosto del 2003 nella zona dell'Europa settentrionale con questo sensore, è stato possibile definire un valore medio dell'indice NDVI per ogni mese. I valori medi sono stati quindi confrontati con i dati raccolti nello stesso periodo nel 2002 ed è stata evidenziata una notevole riduzione nell'attività della vegetazione, dovuta ad una minore attività di fotosintesi (Hagolle et al. 2005). La risoluzione delle immagini telerilevate dal SPOT- 4 è di 1.1 x 1.1 km per pixel e l'ampiezza della strisciata (cioè della parte di superficie terrestre rilevata durante ogni passaggio) è di circa 2000 km. Il sensore VEGETATION è preferibile ad altri sensori analoghi con bassa risoluzione spaziale montati sulla serie dei satelliti SPOT per il più ampio campo di vista (FOV = 101°). Grazie all'ampio FOV è possibile effettuare una raccolta rapida (1 o 2 giorni di tempo a seconda della latitudine) di dati globali medi nella fascia di latitudine compresa tra 40° Sud e 60° Nord.

In alcuni paesi del Nord America, quali ad esempio il Brasile, gli effetti dell'aridità sono stati monitorati utilizzando un set di dati ottenuti mediante il radiometro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) installato a bordo del satellite NOAA (U.S National Oceanic and Atmospheric Administration). L'analisi di questi dati ha permesso di elaborare un indice chiamato VCI

(Vegetation Condition Index) costruito sulla base dell'indice NDVI secondo la formula: VCI=NDVI–NDVImin/(NDVImax–NDVImin) (Kogan 1995). Tale indice mette in risalto le anomalie nel verde confrontando l'indice NDVI attuale con i suoi valori minimi e massimi registrati negli anni precedenti. Il sensore AVHRR presenta una risoluzione spaziale di 1.1 km che permette di esaminare vaste aree ed ha il vantaggio di possedere una buona risoluzione temporale, in quanto il ciclo orbitale completo per il satellite NOAA viene realizzato in 12 ore. Inoltre AVHRR ha una buona risoluzione spettrale e fornisce informazioni nel visibile (VIS), nell'infrarosso vicino (NIR), nell'infrarosso medio (MIR) e nell'infrarosso termico (TIR). Il sensore AVHRR può essere utilizzato per analizzare lo stress idrico della vegetazione combinando misure simultanee nel visibile (VIS), nell'infrarosso vicino (NIR) e nell'infrarosso termico (TIR). I canali del rosso (RED) e dell'infrarosso vicino (NIR) sono utili per calcolare indici di vegetazione correlati con la biomassa e l'attività fotosintetica. La combinazione dei due canali dell'infrarosso vicino (NIR), in particolare la banda 4 (10.3 μm - 11.3 μm) e la banda 5 (11.5 μm – 12.5 μm), permette altresì di ottenere una stima della temperatura della superficie (usando un algoritmo di correzione per gli effetti atmosferici e di emissione). La relazione tra la temperatura della superficie e gli indici di vegetazione è potenzialmente utile per stimare il deficit idrico (Duchemin et al. 1999).

Recentemente (Pereira & Govaerts 2001) è stato sperimentato il sensore denominato SEVIRI montato a bordo del satellite MSG-1, che fa parte dell'ultima generazione di satelliti meteorologici finanziata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea). Il segnale di questo sensore è suddiviso in diverse bande spettrali: 3 nel visibile e 9 nell'infrarosso. I dati acquisiti da questo satellite vengono usati principalmente in campo meteorologico; tuttavia da essi si possono ottenere informazioni sullo stato della vegetazione quasi in tempo reale. Il sensore SEVIRI è dotato, infatti, di elevata risoluzione temporale e fornisce dati ogni 15 minuti.

Per monitorare lo stato di alterazione nelle attività della vegetazione a livello europeo in seguito all'aridità del 2003, è stata utilizzata la serie di dati raccolti nel periodo dal 1998 al 2003 dal sensore SeaWiFS (Sea-viewing Wide

Field-of-view Sensor) e la serie dei dati forniti dal sensore MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) attivo dal gennaio del 2003. Entrambi i sensori hanno una simile copertura nel visibile (VIS) e nell'infrarosso vicino (NIR) distribuita rispettivamente su 8 e 15 bande e sono stati utilizzati per l'elaborazione di due indici di vegetazione: l'indice MGVI (MERIS Global Vegetation Index) (Gobron et al. 1999) e l'indice SGVI (SeaWiFSGlobal Vegetation Index) (Gobron et al. 2001). Tali indici si sono rivelati dei buoni indicatori della frazione di assorbimento della radiazione fotosinteticamente attiva (FAPAR), che è espressione dell'attività fotosintetica di un sistema vegetazionale. Attraverso l'utilizzo di tali indici, Gobron et al. (2005) misero in evidenza che l'attività fotosintetica della vegetazione nell'area dell'Europa settentrionale risultava in diminuzione già a Marzo 2003. Il sensore SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), che è un radiometro a microonde messo in orbita su satelliti meteorologici della serie DMSP (Defense Meterological Satellite Program) e utilizzato come indicatore dell'umidità del suolo, confermava che le zone in cui si erano registrati valori negativi di FAPAR erano le stesse precedentemente caratterizzate da una condizione di deficit idrico.

Un ulteriore indice di vegetazione che viene sfruttato per il monitoraggio dello stress idrico è l'indice LSWI (Land Surface Water Index) (Xiao et al. 2002), che utilizza le bande dell'infrarosso vicino (NIR) e dell'infrarosso a lunghezza d'onda breve (SWIR) secondo la formula: LSWI=(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR). L'indice LSWI è simile nella formula matematica all'indice NDWI, ma rispetto ad esso usa i valori di riflettanza della banda dell'infrarosso a lunghezza d'onda breve (SWIR) (1.628 -1.652 μm). Tale indice è sensibile al contenuto d'acqua nelle foglie e all'umidità del suolo. Nella banda SWIR, infatti, l'assorbimento dipende in gran parte dalla quantità d'acqua all'interno delle foglie e dall'umidità del suolo: maggiore il contenuto d'acqua, maggiore è l'energia incidente che viene assorbita e minore la riflettanza (Lillesand & Kiefer 1994; Xiao et al. 2005). L'indice LSWI viene ricavato da immagini satellitari acquisite dal sensore multispettrale MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), che ha una risoluzione spaziale di 500 m ed è costituito da 36 bande spettrali di cui le

prime sette sono designate per lo studio della vegetazione. In uno studio sulla produttività primaria di foreste di latifoglie decidue (Xiao et al. 2004), una lunga serie di dati raccolti sia su base stagionale che annuale relativi all'indice LSWI ha permesso di confermare l'affidabilità di questo indice per stimare lo stress idrico. Inoltre con questo indice risulta possibile valutare in maniera attendibile l'intera fase fenologica della foglia, dallo sbocciare del germoglio alla piena espansione, nonché la fase di senescenza. Questo fornisce informazioni sull'impatto che lo stress idrico può avere sulla vegetazione a livello fogliare.

Generalmente uno dei limiti tecnici di questi sensori è costituito dalla bassa risoluzione spaziale, cioè dal fatto che l'informazione derivante dall'osservazione di un'area molto vasta è visualizzata con un solo pixel. Ne consegue che tali sensori non sono sfruttabili nell'analisi di piccoli ecotipi forestali. Questo inconveniente è stato in parte superato utilizzando tecniche di disaggregazione. Grazie a tali tecniche, Maselli (2004), utilizzando un set di dati di lungo termine relativi all'indice NDVI, elaborato mediante immagini telerilevate dal sensore AVHRR su satellite NOAA, ha potuto constatare che nell'arco di 15 anni le foreste di pino e quercia di piccole dimensioni nell'area del Bacino del Mediterraneo avevano subíto un progressivo declino come possibile conseguenza di una diminuzione delle precipitazioni durante il periodo invernale. I satelliti a bassa risoluzione hanno però una notevole potenzialità applicativa nel monitoraggio delle condizioni delle foreste a livello globale grazie alla buona risoluzione temporale che consente di archiviare nel giro di poche ore o giornalmente dati di buona qualità relativi allo stato dell'ambiente. La risoluzione temporale di questi sensori permette non solo di monitorare a breve termine (su base stagionale) lo stress idrico sofferto dalla vegetazione, ma consente anche di immagazzinare una grande quantità di dati utili a effettuare confronti nell'arco temporale di più anni, ottenendo così un tipo di monitoraggio su lungo termine in grado di analizzare in modo affidabile la risposta della vegetazione allo stress idrico da aridità.

L'affidabilità dei dati ottenuti da elaborazione di immagini telerilevate dipende in parte dall'eliminazione dell'influenza delle condizioni atmosferiche,

quali ad esempio la copertura nuvolosa, che potrebbe alterare la veridicità della risposta spettrale. Per risolvere questo inconveniente sono stati sviluppati adeguati algoritmi di screening (Hagolle et al. 2005) che permettono di correggere le immagini telerilevate con l'obiettivo di fornire un prodotto attendibile.

I satelliti dotati di alta risoluzione spaziale (da 10 a 100 m per pixel) sono invece impiegati in un diverso tipo di studio del territorio, ossia nel monitoraggio di foreste su scala locale, in quanto l'informazione contenuta in ogni pixel copre un'area composta anche solo di pochi alberi. Mediante l'utilizzo del satellite Landsat 5 TM, che ha una risoluzione di 30 metri, è stato così possibile monitorare efficacemente l'abbattimento di *Pinus pinaster* su estensioni di 1 milione di ettari in varie regioni forestali dell'Aquitania (Francia) e creare una serie temporale in grado di rilevare tempestivamente i cambiamenti dovuti all'abbattimento della specie su base annuale (Jolly et al. 1996).

I satelliti Landsat TM e SPOT – HRV sono stati efficacemente impiegati per stimare l'intensità della caduta delle foglie, che è uno dei primi sintomi visibili in seguito al verificarsi di un evento arido o di attacchi provocati da insetti. La tecnica prevede diverse fasi di processamento ed elaborazione delle immagini attraverso le quali è possibile eseguire un confronto della situazione nell'ambiente prima e dopo l'evento che ha portato alla defogliazione. Con questo approccio si possono ottenere risultati particolarmente soddisfacenti nel monitoraggio e nella quantificazione di rapidi e improvvisi cambiamenti a livello locale nella struttura delle foreste. Netti disboscamenti, danni da eventi atmosferici e da incendi possono così essere identificati e definiti con una accuratezza soddisfacente anche se si verificano nell'ambiente in un limitato periodo di tempo, dell'ordine di poche ore o pochi giorni, e possono essere valutati tempestivamente analizzando i dati breve tempo dopo che si è verificato l'evento. Bisogna però tener conto che la capacità di valutare con precisione l'evento dipende dal grado di intensità e di persistenza di tale fenomeno sull'ambiente. Inoltre è di fondamentale importanza disporre di un set di dati recenti che consentono di eseguire dei confronti con dati storici e di mettere in evidenza l'impatto che fenomeni di disturbo possono avere sulla vegetazione. Il livello di persistenza di un fenomeno è quindi un fattore

chiave che è necessario considerare nell'utilizzo delle tecniche di telerilevamento se l'obiettivo è quello di individuare i rapidi cambiamenti nell'ambiente dovuti a fenomeni di perturbazione. L'analisi di dati telerilevati relativi ad un fenomeno che si presenta con minore intensità ma in modo continuo e progressivo è piuttosto complicato e necessita di osservazioni su lungo termine da organizzare in una banca dati prima di poter apprezzare elementi di disturbo nella vegetazione, come il declino e l'impoverimento delle foreste (Deshayes et al. 2006).

Il monitoraggio su scala locale è importante per lo sviluppo delle politiche di gestione delle foreste poiché permette di rilevare in ambito spaziale e temporale determinati processi di disturbo, quali disboscamento, aridità e così via. La costellazione dei tre satelliti della serie SPOT offre il vantaggio di disporre di sensori ad alta risoluzione temporale, quindi i dati telerilevati possono essere immagazzinati quotidianamente, ma purtroppo la loro operatività è limitata unicamente ad alcune aree dell'Europa settentrionale. Per migliorare le attività di monitoraggio su scala locale, nel 2009 la missione VENµS ha previsto il lancio in orbita di un satellite ad alta risoluzione spaziale (10 m), con una risoluzione temporale elevata (due giorni) e con una risoluzione spettrale di 12 bande.

Una strategia mirata a comprendere le variazioni delle specie vegetali su scala locale è quella di combinare i dati telerilevati da un satellite (ad alta o bassa risoluzione spaziale) con tecniche di rilevamento dati in campo. La raccolta di dati a terra ancora oggi è necessaria per convalidare la metodologia del telerilevamento e per acquisire una visione consistente ed esaustiva della condizione delle foreste (Deshayes et al. 2006). In questo senso, il programma GMES (Global Monitoring for Environment and Security) lanciato dalla Commissione Europea e dall'ESA (European Space Agency) si pone l'obiettivo di acquisire dati per monitorare la condizione delle foreste su scala locale e regionale avvalendosi di metodologie di osservazione sia dallo spazio che direttamente in campo, nella prospettiva di ottenere informazioni rilevanti sulla condizione delle foreste a livello europeo.

4.3 Uso di metodi ecofisiologici

4.3.1 Misura dell'impatto dell'aridità su singole specie

Grazie agli studi delle relazioni pianta-acqua nell'ambito dell'ecofisiologia vegetale è oggi possibile definire in modo affidabile il comportamento di una specie vegetale in un determinato habitat arido e valutarne l'adattabilità. Lo studio dello stress idrico e delle risposte delle piante alla condizione di stress è un compito particolarmente impegnativo e vari tentativi sono stati fatti per individuare punti di riferimento comparabili e generalizzabili. Sono, infatti, molti i parametri fisiologici che generalmente sono strettamente influenzati da un minor approvvigionamento idrico all'interno del suolo e che possono essere convenientemente impiegati per stimare il livello di stress idrico sofferto dalla vegetazione. Lo stress idrico viene generalmente valutato mediante i parametri relativi alle relazioni pianta-acqua, tra i quali: il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}), la conduttanza fogliare al vapore d'acqua (g_L) e la conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}). Più complessi da misurare in modo affidabile sono: la conduttanza idraulica della radice e le sue variazioni stagionali. Il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) rappresenta l'energia libera dell'acqua nell'apparato disperdente della pianta, ed esprime in modo soddisfacente il bilancio idrico della pianta all'interfaccia con l'atmosfera. I parametri di riferimento relativi al potenziale dell'acqua, generalmente utilizzati nella stima dell'entità dello stress dovuto alla carenza idrica sono il potenziale pre-alba ($\Psi_{prealba}$ – potenziale dell'acqua della foglia misurato prima del sorgere del sole), il potenziale minimo diurno (Ψ_{min} – potenziale dell'acqua della foglia raggiunto nelle ore più calde del giorno) e la caduta massima diurna di potenziale dell'acqua della foglia ($\Delta\Psi=\Psi_{prealba}-\Psi_{min}$).

Il potenziale pre-alba ($\Psi_{prealba}$) viene generalmente misurato allo scopo di ottenere una stima del potenziale dell'acqua del suolo (Ψ_{suolo}), che permette di avere informazioni relative alla quantità d'acqua disponibile per la pianta. Il presupposto dal quale si parte è che la traspirazione durante la notte si riduce notevolmente così che il potenziale dell'acqua della pianta (Ψ_{pianta}) si trova in equilibrio con il potenziale dell'acqua del suolo (Ψ_{suolo}). Alcuni studi recenti hanno

però messo in dubbio la validità dell'utilizzo di $\Psi_{prealba}$ come indicatore dello stato d'acqua nelle piante. In alcuni casi, infatti, tale parametro non era risultato coincidente con il potenziale dell'acqua del suolo soprattutto in ambienti aridi (Améglio et al. 1999; Donovan et al. 1999). Se il suolo si prosciuga in modo notevole, si può formare un'interfaccia d'aria tra le radici e il suolo che tende a sottostimare il Ψ_{suolo} (Stirzaker & Passioura 1996). Inoltre, in altri casi si è osservato che, in suoli umidi, le piante possono perdere notevoli quantità d'acqua per traspirazione anche durante le ore notturne (Benyon 1999) e quindi non essere più in grado di equilibrare il loro potenziale d'acqua con quello del suolo. Stimare Ψ_{suolo} sulla base di $\Psi_{prealba}$ in modo affidabile è possibile se si tiene conto che $\Psi_{prealba}$ rappresenta il massimo (il meno negativo) potenziale dell'acqua che la pianta può raggiungere in determinate condizioni (Nardini et al. 2003a). Vi sono, infatti, alcuni suoli con substrato roccioso, caratterizzati da una estesa rete di fratture e fessure in cui le radici possono infiltrarsi in profondità. Misurare direttamente il potenziale di un campione del suolo può quindi fornire false informazioni sul potenziale dell'acqua della pianta. È noto che la presenza di un profondo, ramificato e denso apparato radicale rappresenta uno dei tratti più efficaci che conferisce tolleranza all'aridità, in quanto permette alle piante un più alto accesso alle riserve d'acqua e di nutrienti del suolo. In particolare è la profondità della più piccola frazione di biomassa radicale che ricopre un ruolo di fondamentale importanza nel garantire il quantitativo di acqua necessario alla sopravvivenza della pianta (Bréda et al. 2006).

D'altro canto, semplici misure di Ψ_{min} non sono in grado di fornire informazioni sul reale impatto dello stress idrico sulla crescita e produttività della pianta. Come già accennato, è la durata del valore minimo di potenziale dell’acqua della foglia che determina il limite minimo di energia libera dell’acqua cui la pianta va incontro in un determinato giorno. Tuttavia sottraendo al potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{min}) il potenziale al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}), che rappresenta il punto del potenziale a cui si azzera il turgore (Salleo 1983), si ottiene un'informazione importante e cioè la quantità di turgore residuo, disponibile per l'accrescimento e il metabolismo fogliare. Un fattore critico nel

determinare gli effetti negativi dello stress idrico è stato individuato, infatti, proprio nella caduta del turgore cellulare. Inoltre Ψ_{min} può fornire utili indicazioni sul punto in cui Ψ_{foglia} scende al di sotto di valori critici (Ψ_{CAV}) specie-specifici, ai quali corrisponde l'innescarsi dei fenomeni di embolia gassosa dei vasi xilematici, che riducono l'efficienza di trasporto dell'acqua all'interno della pianta, con conseguentemente verificarsi di cavitazione.

Il fenomeno della cavitazione è conseguenza del fatto che l'acqua all'interno dei condotti xilematici viene trasportata in un permanente stato metastabile di pressione negativa o tensione. Ne deriva che il rischio di rottura delle colonne d'acqua (cavitazione) è molto elevato e rappresenta uno dei maggiori pericoli per l'integrità funzionale del sistema xilematico. Studi relativi alla vulnerabilità alla cavitazione indicano che le caratteristiche anatomiche del sistema vascolare influiscono sulla vulnerabilità di una specie alla cavitazione. Generalmente i vasi ad ampio diametro sono più vulnerabili rispetto ai vasi di diametro ridotto. Il danno provocato da un evento cavitativo è maggiore quando viene danneggiato un vaso lungo rispetto ad uno corto perché la porzione di sistema conduttore danneggiata è percentualmente maggiore. È ben noto, infatti, che il diametro di un vaso è direttamente proporzionale alla sua lunghezza (Zimmermann 1983; Nijsse 2004). In realtà le dimensioni dei condotti xilematici non sono il fattore-chiave nel determinare la vulnerabilità di una specie rispetto ad un altra (Tyree et al. 1994; Hacke & Sperry 2001). Un crescente numero di studi ha chiaramente dimostrato che la cavitazione xilematica non è determinata dal diametro del vaso xilematico in quanto tale quanto piuttosto dalle dimensioni dei pori delle membrane delle punteggiature (Zimmermann 1983; Tyree & Sperry 1989; Sperry & Tyree 1990; Cruiziat et al. 2002). Una bolla d'aria entra in un condotto xilematico quando a livello della membrana della punteggiatura si viene ad instaurare un gradiente di pressione critico tale da ridurre il raggio del menisco aria-acqua fra un vaso funzionante ed uno embolizzato (pieno d'aria) fino a valori inferiori al raggio dei pori della membrana della punteggiatura. Una specie in cui il diametro dei pori delle membrane della punteggiatura sia particolarmente piccolo,

sarà quindi in grado di sopportare pressioni intraxilematiche più negative prima di andare incontro ad eventi cavitativi. Una bassa vulnerabilità all'embolia è quindi un parametro-chiave nella strategia di tolleranza di una specie vegetale all'aridità. Alle caratteristiche anatomiche si aggiungono poi le caratteristiche fisiologiche, che permettono ad un numero limitato di specie vegetali di riparare i danni causati dal fenomeno della cavitazione. Uno dei meccanismi attivi di recupero dei vasi cavitati è quello della pressione radicale, che può determinare il riempimento di vasi embolizzati come nel caso del faggio (*Fagus sylvatica* L.), anche se il recupero dell'efficienza del sistema vascolare è parziale in quanto limitato al periodo primaverile (Cochard et al. 2001). Il recupero totale della capacità di trasporto dell'acqua avviene solamente con la produzione di nuovi vasi nell'anno successivo al verificarsi dell'aridità. Le ricerche più recenti hanno dimostrato come la riparazione dei danni da cavitazione possa aver luogo anche quando la pressione all'interno dei vasi si mantiene su valori sostanzialmente negativi (Salleo et al. 1996; Tyree et al. 1999; Holbrook & Zwieniecki 1999). I dati finora disponibili tuttavia si riferiscono a poche specie e pertanto non è possibile comprendere quanto il fenomeno del recupero dei vasi cavitati sia generalizzabile e gli studi sui meccanismi che lo renderebbero possibile necessitano di ulteriori approfondimenti. Resta pur sempre vero che evitare il fenomeno della cavitazione rimane per le piante il modo più efficace per affrontare un periodo di ridotta disponibilità d'acqua all'interno del suolo e che il controllo della traspirazione mediante regolazione stomatica ricopre un ruolo fondamentale in tale contesto (Bréda et al. 2006).

Gli stomi delle piante superiori possono essere paragonati a valvole idrauliche molto sensibili, in grado di regolare rapidamente la loro apertura in funzione del variare dello stato di idratazione dei tessuti fogliari. Come è già stato detto, la prima risposta fisiologica della pianta all'aridità è la chiusura degli stomi, che rappresenta una difesa contro l'eccessiva traspirazione (Meinzer 2002). Ne consegue che in condizioni di stress idrico lieve o moderato la conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), che è espressione della cinetica stomatica, si riduce determinando una riduzione dei processi fotosintetici e dunque

dell'accrescimento generale della pianta. In condizioni di stress grave, oltre a questi effetti, si osserva un aumento della respirazione che determina un rapido consumo delle riserve. Quando la condizione di stress idrico grave si protrae a lungo nel tempo, possono intervenire condizioni di strain plastico, ossia irreversibile, i cui effetti principali sono lesioni biochimiche ed effetti negativi sull'ultrastruttura cellulare. Gran parte della chiusura stomatica osservata durante il periodo di aridità non è semplicemente una risposta strettamente proporzionale all'inaridimento del suolo ma anche il risultato degli effetti amplificati della riduzione della conduttanza idraulica liquida dal suolo alle foglie. Cochard (2002) ha descritto le relazioni esistenti tra cavitazione a livello di foglia e apertura stomatica in *Zea mays* L. In questo caso, gli stomi si chiudevano prima che il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) raggiungesse la soglia critica del potenziale di cavitazione (Ψ_{CAV}). Il rilascio di sostanze chimiche, quali ad es. l'acido abscissico (ABA) sintetizzato a livello radicale in risposta al prosciugarsi del suolo, potrebbe essere il segnale che induce la risposta stomatica di chiusura alla limitazione idrica (Davies & Zhang 1991). In alcuni studi (Nardini & Salleo 2000; Salleo et al. 2000) è stata avanzata l'ipotesi che la diminuzione di conduttanza idraulica del fusto (e probabilmente anche della foglia) in seguito alla cavitazione di alcuni ampi condotti xilematici, possa agire da segnale per la chiusura degli stomi. In tal modo verrebbe impedito al potenziale xilematico di diminuire ulteriormente, circostanza che potrebbe causare la diffusione dell'embolia (Trifilò et al. 2003; Cruiziat et al. 2002). Vi sono poi specie, quali quelle appartenenti al genere *Populus,* che non sono dotate di un efficace sistema di chiusura degli stomi in presenza di stress idrico del suolo e quindi queste specie vanno incontro a cavitazione prima che avvenga la completa chiusura degli stomi (Cochard et al. 1996). La conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) è quindi un parametro importante nella risposta allo stress idrico. Essa risulta essere sensibile a fattori esterni (disponibilità dell'acqua nel suolo) e interni alla pianta (ABA, conduttanza idraulica xilematica, stato dell'acqua della foglia) e quindi può essere considerata un parametro di riferimento con un valore aggiunto rispetto al parametro relativo al potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia})

(Medrano et al. 2002).

La conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) è anche un parametro importante nella rilevazione della risposta delle singole specie allo stress idrico da aridità. In numerosi studi, sia classici che recenti, è stato riportato che la conduttanza idraulica della foglia, o il suo valore inverso (la resistenza idraulica della foglia, R=1/K), è un parametro che contribuisce per circa il 50 % alla resistenza idraulica complessiva della pianta (Nardini & Salleo 2000). Il bilancio idrico delle piante dipende dalla loro capacità di modulare la conduttanza idraulica, sia nella fase liquida che in quella di vapore, in risposta ai cambiamenti negli stimoli ambientali (Tyree & Zimmermann 2002). In particolare, K_{foglia} è un parametro altamente dinamico che può variare a seconda delle condizioni microclimatiche e di crescita che si presentano (Sack & Holbrook 2006). In periodi di ridotta disponibilità di acqua all'interno del suolo, le specie vegetali che presentano un elevato valore di K_{foglia} sono quelle che mostrano la più bassa variazione di Ψ_{foglia} su base diurna e i più alti valori minimi di Ψ_{foglia}. La migliore strategia di risposta su lungo termine che le piante possono adottare per migliorare l'efficienza di trasporto dell'acqua nel continuum dal suolo alle foglie è quella di aumentare l'allocazione di biomassa nell'apparato assorbente (radici) o nell'apparato conduttore (fusto) (Sperry et al. 2002). Tuttavia una strategia mirata ad ottenere lo stesso risultato può essere realizzata riducendo la superficie traspirante delle foglie mediante una più o meno marcata caduta delle foglie.

Nello studio della risposta delle piante all'aridità, una delle metodologie più affidabili è rappresentata dallo studio degli isotopi stabili del carbonio. Il contenuto isotopico di una sostanza, espresso come rapporto isotopico, è molto variabile a causa degli "effetti isotopici" che favoriscono un isotopo rispetto ad un altro, creando così dei serbatoi arricchiti e altri impoveriti in un certo isotopo. La composizione isotopica del carbonio nelle piante è determinata dagli effetti isotopici associati alla fissazione fotosintetica di CO_2. Le piante durante la fotosintesi generalmente discriminano contro l'isotopo pesante ^{13}C e, pertanto, i prodotti fotosintetici risultanti sono alleggeriti isotopicamente rispetto alla CO_2 atmosferica. Questo processo di discriminazione isotopica (Δ) avviene in due fasi,

durante la diffusione di CO_2 fino ai cloroplasti e durante la carbossilazione enzimatica (Farquhar et al. 1982). Nel processo di diffusione della CO_2 attraverso l'apertura stomatica, la specie isotopica $^{12}CO_2$ diffonde più rapidamente (del 4.4%) rispetto a $^{13}CO_2$ verso il sito di carbossilazione. Nelle piante C3 il passaggio che determina la maggior discriminazione isotopica è la reazione di carbossilazione catalizzata dalla Rubisco, che ha un valore di discriminazione isotopica (Δ) di –30‰. Per contro, la PEP carbossilasi, il principale enzima che fissa CO_2 nelle piante C4, ha un effetto discriminante isotopico minore (Δ è compresa tra -2 e -6‰). A causa degli effetti isotopici diffusivi e biochimici coesistenti, la discriminazione isotopica (Δ) fotosintetica è linearmente correlata con il rapporto tra le pressioni parziali intercellulare e atmosferica di CO_2 (Farquhar et al. 1982). Una maggiore discriminazione isotopica avviene quando la pressione parziale della CO_2 negli spazi aeriferi intercellulari della foglia (C_i) è elevata e gli stomi sono aperti. Quando gli stomi sono chiusi, la discriminazione isotopica per carbossilazione è nulla. Poiché la discriminazione isotopica (Δ) è fortemente influenzata da variazioni nella capacità fotosintetica e di conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), dallo studio degli isotopi stabili del carbonio nelle piante è possibile lo studio degli scambi atmosfera-vegetazione in relazione al bilancio delle limitazioni biochimiche alla fotosintesi, nonché degli effetti esercitati da stress ambientali sulla produttività vegetale (Brugnoli & Farquhar 2000). L'analisi della discriminazione isotopica del carbonio viene generalmente effettuata sulla CO_2 prodotta da combustione di campioni di sostanza organica o di metaboliti purificati. I rapporti isotopici ($R={}^{13}C/{}^{12}C$) vengono determinati con spettrometri di massa isotopici (IRMS), che forniscono la composizione isotopica ($\delta^{13}C$) rispetto ad uno standard. La discriminazione isotopica del carbonio viene infine calcolata rispetto al rapporto isotopico del carbonio dell'aria in accordo a Farquhar e Richards (1984): $\Delta^{13}C= (\delta_{aria}-\delta_{pianta})/(1+ \delta_{pianta})$ dove δ_{pianta} è $\delta^{13}C$ del materiale vegetale e δ_{aria} è la composizione isotopica della CO_2 atmosferica assunta pari a -8‰.

Tutti i parametri fisiologici finora menzionati, oltre a manifestare i vari meccanismi di adattamento allo stress, possono essere anche utilizzati proprio

per quantificare lo stress, utilizzando, in un'attività di biomonitoraggio, una metodologia di tipo comparativo. Ciò chiaramente implica una scelta preventiva delle specie bioindicatrici, che devono presentare variazioni sufficientemente sensibili in tali parametri.

4.3.2 Integrazione di metodi ecofisiologici con metodi di telerilevamento

Numerosi studi hanno stimato l'impatto dello stress idrico sulle singole specie in modo affidabile attraverso la standardizzazione di un indice basato su un solo parametro fisiologico e cioè l'integrale del potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) calcolato nell'intervallo di tempo fra pre-alba e il tramonto. Tale indice è stato inizialmente introdotto come WSIS (Water Stress Impact on Species) (Mishio & Yokoi 1991; Vertovec et al. 2001; Salleo et al 2002; Salleo & Nardini 2003) e successivamente noto come WSI (Water Stress Index) (Nardini et al. 2003a). Il WSIS veniva calcolato attraverso l'analisi della curva interpolante la successione giornaliera completa (dall'alba al tramonto) di Ψ_{foglia} secondo la formula:

$$WSIS=\int_{t_0}^{t_x} \psi_{foglia} \cdot dt$$

dove t_0 corrisponde all'alba e t_x al tramonto. Tenendo conto della durata in cui tale parametro fisiologico si manteneva su valori critici, era possibile interpretare con precisione la pressione ambientale esercitata sulle piante dal deficit idrico. Inoltre, questo indice, che esprime lo stress idrico sofferto dalle varie specie, era messo in relazione con la densità della vegetazione, stimata sia con osservazioni dirette in campo che con immagini telerilevate da satellite, che sono state utilizzate per calcolare l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). In tal modo, i dati fisiologici ottenuti da singole specie vegetali erano integrati con il rilievo della vegetazione, permettendo di trarre così informazioni riferite ad un'area campione. Nell'ambito del progetto Demos (“Desertification in Mediterranean drylands: development of a monitoring system based on plant ecophysiology”, Salleo & Nardini 2003) sviluppato in diverse aree della Turchia e del Libano caratterizzate da differenti livelli di degrado della copertura vegetazionale, l'indice WSIV ha

dimostrato di correlarsi significativamente sia con la percentuale stimata di copertura vegetazionale che con l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e l'indice DRI (Desertification Risk Index), ottenuto dalla combinazione di dati telerilevati e dati climatici (Feoli et al. 2003). Questi risultati, che erano sorprendenti, suggerivano la possibilità di ottenere uno “scaling-up” ecofisiologico, ossia valutare il livello di stress idrico sofferto dalle piante su ampia scala e su differenti ecosistemi.

L'integrazione del telerilevamento con i metodi ecofisiologici rappresenta quindi un potente ed efficace strumento di indagine conoscitiva di base, applicabile innanzitutto su singole specie in un'area limitata e successivamente in aree più ampie. Esso è di fatto utile ad individuare aree potenzialmente soggette ad aridità ambientale. Recentemente (Salleo et al. 2004) è stato dimostrato che una tale integrazione di discipline può essere applicata con buona affidabilità anche su agro-ecosistemi per migliorarne la produttività. Lo studio riporta misure ecofisiologiche di g_L e Ψ_{min} su foglie di *Vitis vinifera* cv Sauvignon e di contenuto di zuccheri nel mosto d'uva in due vigneti nella zona di Gorizia, in Friuli-Venezia Giulia. L'indice di telerilevamento applicato era l'NDVI. I risultati dimostravano correlazioni significative tra i dati telerilevati e i due parametri ecofisiologici. In campo agricolo dunque l'applicazione congiunta di queste due metodologie si è rivelata utile a migliorare opportunamente la gestione delle pratiche di irrigazione e quindi ad ottimizzare il consumo d'acqua e di conseguenza ad aumentare la qualità di produzione del vino.

Studi finalizzati alla ricerca di indici di aridità ambientale basati su parametri a carattere ecofisiologico sono tuttora particolarmente scarsi. Se le attuali linee direttrici della ricerca in ambito ecofisiologico sono rivolte a sviluppare una concezione olistica degli organismi vegetali in habitat a rischio di aridità, è necessario individuare nell'insieme dei parametri fisiologici quelli che possono essere assunti a riferimento nel quantificare l'aridità ambientale attraverso la standardizzazione di un indice di aridità ambientale.

PARTE SPERIMENTALE

5 Scopo del lavoro

Nella presente ricerca vengono presentate misure di parametri descrittivi delle relazioni pianta-acqua eseguite su una specie legnosa rappresentativa della vegetazione locale, in differenti ambienti dell'area carsica della provincia di Trieste caratterizzati da diversi livelli di aridità. Il Carso triestino è, infatti, un'area potenzialmente interessata dal fenomeno dell'aridità ambientale a causa del carattere prevalentemente carbonatico delle sue rocce, che causa livelli diversi di drenaggio dell'acqua all'interno del substrato roccioso. L'assetto strutturale del territorio carsico influenza quindi notevolmente la capacità di campo del suolo e la quantità d'acqua disponibile per la pianta. Inoltre gli effetti del clima locale, in cui durante il periodo estivo a temperature molto elevate è associata una scarsa piovosità, creano una situazione di aridità particolarmente accentuata.

Si è scelto di avvalersi anche di tecniche di telerilevamento da satellite per valutare una possibile calibrazione dei dati ottenuti mediante misurazioni di parametri fisiologici nei siti sperimentali con i dati relativi all'indice telerilevato LSWI (Land Surface Water Index). Tale scelta nasceva dalla considerazione che mediante l'interazione di dati di campo con quelli ottenibili da sistemi satellitari fosse possibile indicare parametri di riferimento da utilizzare nello “scaling-up” ecologico. Tale approccio costituisce una delle attuali linee direttrici della ricerca ecofisiologica su larga scala e prevede l'applicazione di modelli costruiti sulla base dei rilevamenti satellitari a sistemi sempre più grandi, quali formazioni vegetali, agroecosistemi ed ecosistemi naturali, allo scopo di individuare tendenze generali di grandi aree per quanto attiene all'espansione o alla contrazione della vegetazione in relazione all'aridità ambientale. In tale contesto, la pianta nel suo complesso costituisce la fonte di dati primari per il perfezionamento e l'apprezzamento dei dati ricavati dalle metodologie satellitari.

Il progetto di ricerca si è posto l’obiettivo di individuare e definire un indice affidabile di aridità ambientale, che consentisse di rappresentare le relazioni che la pianta contrae con l'acqua presente nell'ambiente in funzione della risposta fisiologica della pianta al variare del contenuto idrico del suolo, attraverso un

valore unico a significato ecofisiologico. La standardizzazione di un tale indice di aridità ha consentito quindi di proporre un parametro ecofisiologico, di facile rilevazione in campo, utile a quantificare lo stress idrico sofferto da una specie vegetale biomonitor.

6 Materiali e metodi

6.1 La specie studiata: caratteristiche ecologiche

L'orniello (*Fraxinus ornus* L.) appartiene alla famiglia delle Oleaceae ed è una specie decidua dal legno a porosità anulare (Speranza & Calzoni 1996). L'areale di distribuzione è europeo centro-meridionale e asiatico-occidentale (Fig. 1). In Italia è comunissimo nella fascia prealpina dal Carso triestino fino ai Laghi Lombardi, penetra lungo le valli principali fino al cuore delle Alpi, ma in generale non supera i 600 m di altitudine (raramente arriva fino a 1000 m). Comune pure sui Colli Euganei e Berici, manca invece quasi totalmente nella regione Padana. È abbondantissimo nell'Appennino Settentrionale e Centrale, soprattutto sul versante adriatico, mentre diviene progressivamente più raro e relegato in ambienti collinari e montani freschi nel Meridione. In Sicilia sale fino a 1400 m. Nelle regioni occidentali quali Piemonte, Toscana, Sardegna e Corsica questa specie sub-pontica diviene progressivamente più rara (Pignatti 1982).

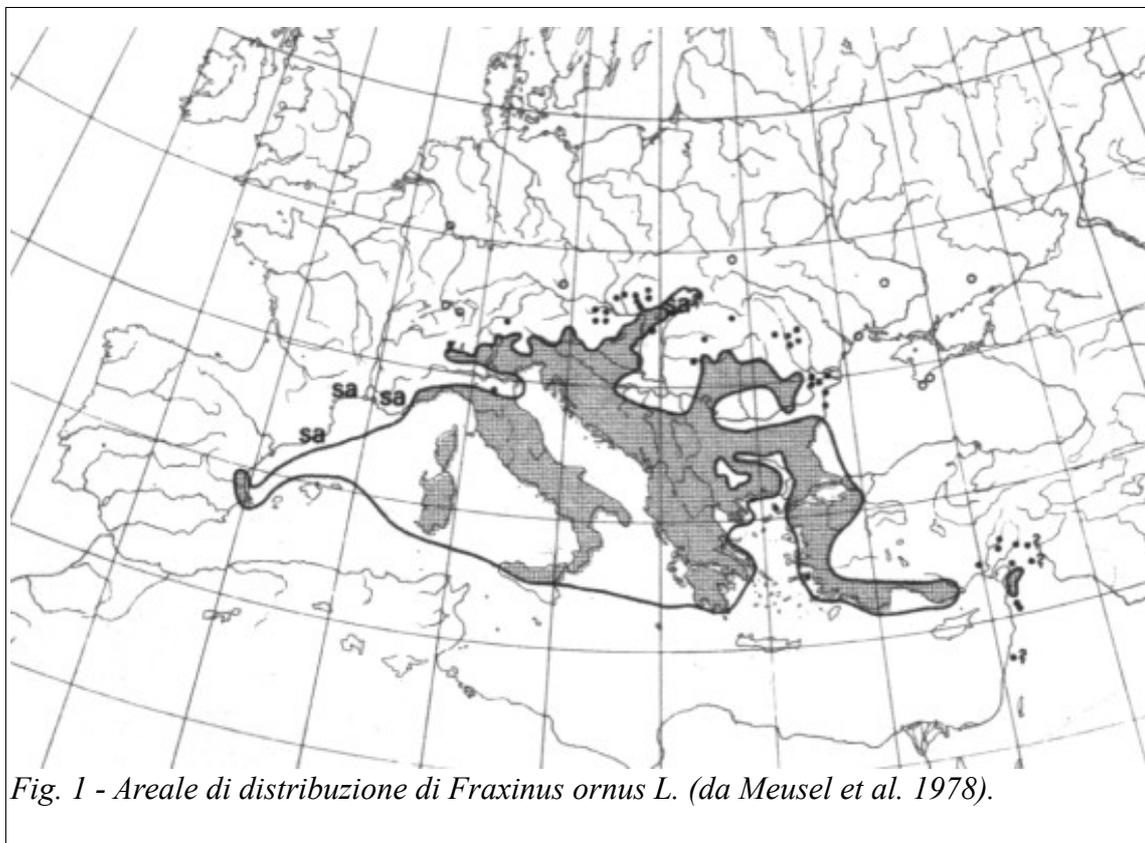
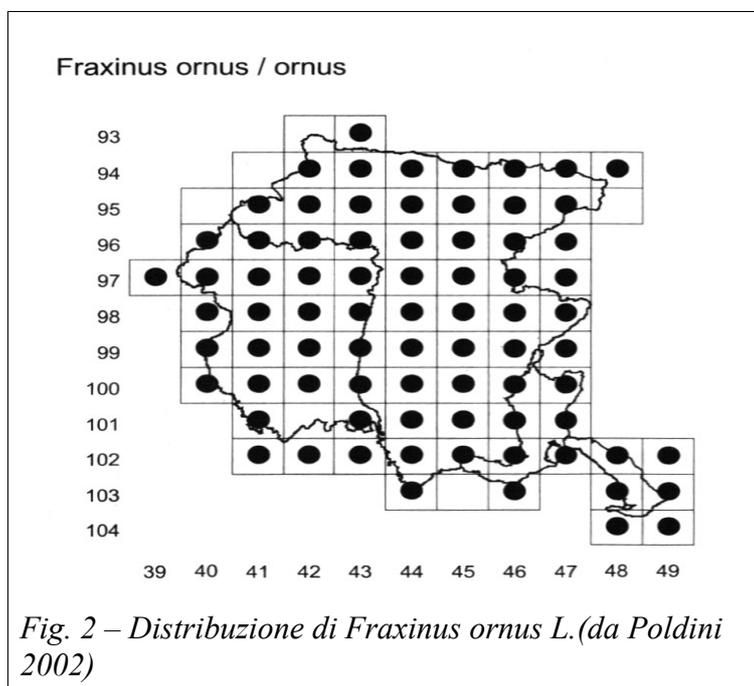



Fig. 1 - Areale di distribuzione di Fraxinus ornus L. (da Meusel et al. 1978).

Nella regione Friuli-Venezia Giulia e nel territorio carsico triestino, l'orniello è in grado di diffondersi in una grande varietà di micro-ambienti (fig. 2) ed è una tipica componente del paesaggio carsico (Poldini 1989). Nella macchia mediterranea corrispondente al tratto di fascia costiera compreso tra Santa Croce e Sistiana-Duino Aurisina, in cui accanto al leccio (*Quercus ilex* L.) appaiono altre sclerofille mediterranee sempreverdi arboree, l'orniello si trova inserito in un complesso di specie caducifoglie termofile di provenienza più genericamente sudest-europea (se non addirittura illirico-balcanica) quali il carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.) e lo scotano (*Cotinus coggygria* Scop.). L'associazione che si estende in questa particolare macchia a boschi xero-termofili su substrati calcarei è l'*Orno-Quercetum ilicis*, i cui due rappresentanti più tipici sono *F. ornus* per il contingente illirico e *Q. ilex* per quello mediterraneo. Non appena si oltrepassa il crinale dell'altopiano carsico, vi è la sparizione pressoché totale della vegetazione mediterranea. Subentrano così boschi misti a distribuzione illirica che si sviluppano nel piano collinare (200-500 m) su calcari o flysch. Sono boschi zonali e ampiamente diffusi appartenenti all'associazione *Ostryo-Quercetum pubescentis,* all'interno della quale dominano nel piano alto-arbustivo oltre a *F. ornus,* anche *O. carpinifolia* e *Q. pubescens.* Nel soprassuolo arboreo del bosco di dolina l'orniello, assieme al carpino nero, si trova disposto ai margini, mentre è invece molto frequente nei querceti carsici a rovere (*Q. petraea* Matt. Liebl.) e cerro (*Q. cerris* L.), appartenenti all'associazione *Seslerio autumnalis-Quercetum petraeae*, che si sviluppano su suoli colluviali di basso pendio (200-500 m) e su terre rosse o rilievi a flysch nelle aree del Monte Lanaro, Banne e Monrupino.

L'orniello è stato scelto come biomonitor in quanto questa specie si distingue in modo notevole per la sua grande capacità di resistenza a condizioni di stress idrico da aridità (Tretiach 1993; Radoglou & Raftoyannis 2000; Nardini et al. 2003a; De Mei & Di Mauro 2006). Inoltre, in studi basati su ricerche statistiche relative al meccanismo di riforestazione spontanea in zone di pascolo e su lande rupestri (Poldini 1989), è risultato che l'orniello era l'unica specie ad avere la stessa frequenza in tutto il processo di riforestazione spontanea e grazie alla sua ampiezza ecologica può quindi svolgere un ruolo molto importante sia nelle fasi

d'incespugliamento che nella costituzione del bosco maturo.

Fig. 2 – Distribuzione di Fraxinus ornus L.(da Poldini 2002)

6.2 Descrizione dei siti sperimentali

Dal punto di vista geografico il Carso triestino ha un estensione di 211.2 km^2 e comprende il territorio delle provincie di Trieste e Gorizia. Nei suoi limiti geografici naturali il Carso classico si estende anche in territorio sloveno e comprende l'area a substrato calcareo delimitata a nord dalle alluvioni dell'Isonzo, a nord-est ed ad est dai fiumi Rasa e Vipacco, ad ovest dai substrati marnoso-arenacei (flysch) sopra la città di Trieste, a sud e a sud-est di nuovo dal passaggio a rocce non carsificabili (flysch) e dal solco della Val Rosandra. La superficie dell'altopiano degrada da sud-est a nord-ovest nella provincia di Trieste, più irregolarmente da nord a sud nella provincia di Gorizia (ERSA 2006). Dal punto di vista litologico, il Carso è costituito da una potente successione carbonatica deposta tra il Cretacico superiore e l'Eocene inferiore (Cucchi et al. 1987). È in questa serie che si sono largamente sviluppati variegati esempi di morfologie carsiche superficiali (polje, doline, campi solcati, grize) e sotterranee

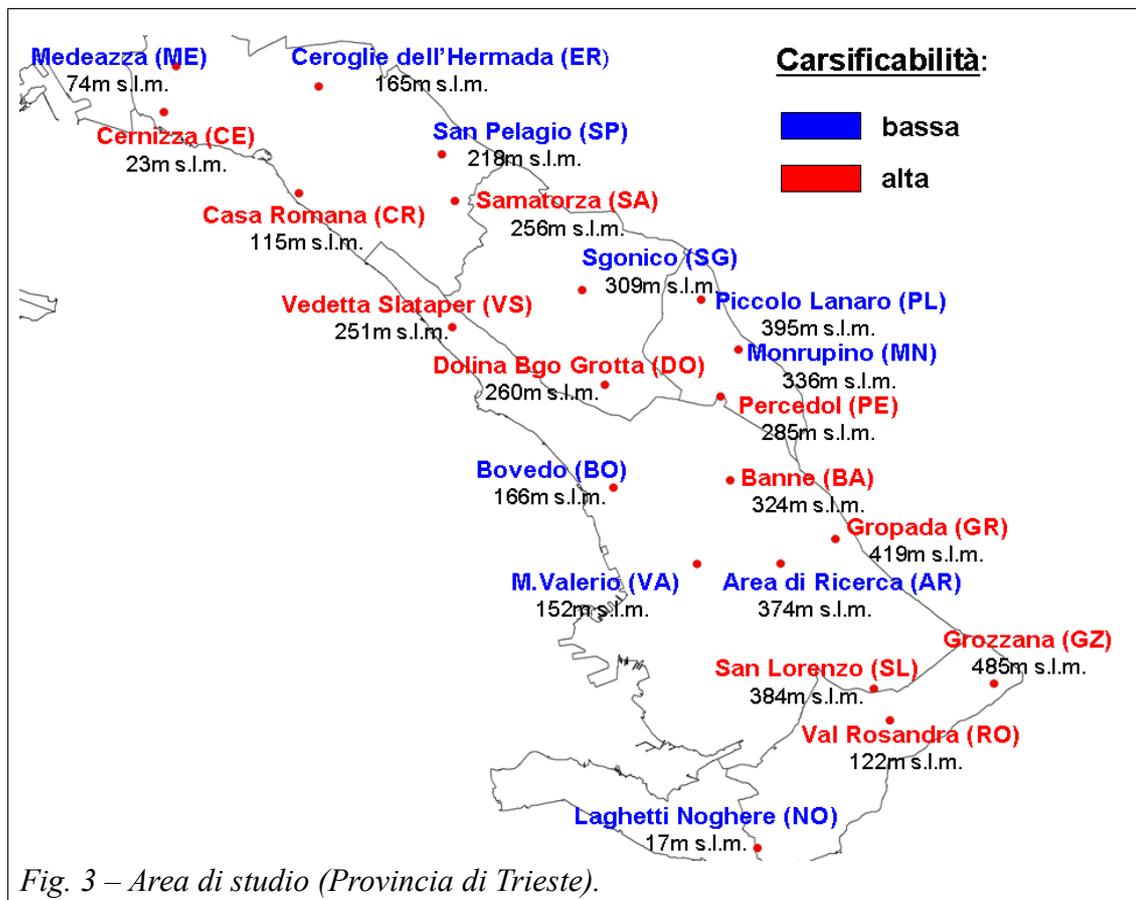
(grotte), derivanti dall'azione corrosiva ed erosiva delle acque meteoriche che qui hanno trovato nella purezza dei calcari e nell'assetto strutturale una situazione particolarmente favorevole per la loro azione, che dà origine al fenomeno noto come “carsismo”. Vi sono poi alcune fasce più limitate presenti in prossimità e parallelamente al confine di stato tra Monrupino e Malchina, caratterizzate da calcari bituminosi fittamente stratificati o da alternanze di calcari, calcari dolomitici e dolomie. In queste zone il suolo è presente con una maggiore continuità e gli affioramenti sono pertanto più rari. L'assenza di un'idrografia superficiale, ad eccezione della forra carsica nella Val Rosandra e dell'area sorgentifera delle Foci del Timavo che danno origine a brevi percorsi fluviali, è inoltre uno degli aspetti più tipici dei paesaggi carsici, conseguenza dell'elevata permeabilità e del rapido drenaggio del substrato roccioso, che si presenta fratturato ed intensamente carsificato.

Dal punto di vista climatico, il Carso si trova in una zona di transizione fra un clima di tipo mediterraneo e un clima di tipo continentale-prealpino. In una tale situazione di soglia, le particolari condizioni morfologiche e topografiche determinano la predominanza di un tipo di clima sull'altro, rendendo in alcune zone ancora più eterogenea la situazione con la differenziazione di alcuni “microclimi” dai quali dipendono certi aspetti di dettaglio della vegetazione. Le precipitazioni, concentrate prevalentemente nei mesi primaverili e autunnali, variano attorno a 850-900 mm annui. Durante la stagione estiva (Giugno-Agosto) il deficit pluviometrico è compreso tra 100 e 170 mm. Le medie delle temperature minime sono di circa 3°C, ma le gelate sono particolarmente frequenti tra Dicembre e Febbraio. Le medie delle temperature massime si aggirano tra i 25°C e i 28°C con massimi assoluti di 35°C (ERSA 2006).

Avvalendoci della collaborazione con il Dipartimento di Geologia dell'Università degli Studi di Trieste è stato possibile definire le stazioni di campionamento per l'attività di biomonitoraggio in base al “grado di carsificabilità” della roccia nel suolo utilizzando una mappa geologica (Cucchi et al. 1987). Nell'ambito strettamente geologico e paleontologico, la carsificabilità venne proposta come criterio per classificare in modo corretto i fenomeni carsici epigei

relativi alle carbonatiti calcaree presenti nel Carso triestino (Forti 1972; Forti et al. 1975). La carsificabilità è un criterio geomorfologico che, sebbene empirico, può essere applicato anche in campo ecofisiologico in quanto influenza la capacità di campo di un suolo ed è variabile in rapporto alle condizioni geolitologiche del substrato roccioso (litotipo e livello di fessurazione/fratturazione, Cucchi et al. 1989). La carsificabilità non è rappresentabile numericamente attraverso un indice ma esprime in modo indiretto e qualitativo il rischio di aridità di una determina area.

L'attività di monitoraggio è stata realizzata in un'area comprendente nel complesso 21 stazioni di campionamento (Fig. 3). Le aree di studio sono state quindi divise sulla base del livello di carsificabilità, in due gruppi: uno a carsificabilità bassa o molto bassa (Monrupino, Piccolo Lanaro, Laghetti Noghere, San Pelagio, Bovedo, Medeazza, Ceroglie dell'Hermada, Area di ricerca, Monte Valerio, Sgonico) e uno a carsificabilità alta o altissima (Val Rosandra, Grozzana, Banne, dolina di Borgo Grotta Gigante, Percedol, Samatorza, Gropada, Casa Romana, San Lorenzo, Cernizza, Vedetta Slataper). Nei siti a bassa o molto bassa carsificabilità, ci può essere in parte compensazione del deficit pluviometrico grazie all'acqua trattenuta all'interno della frazione argillosa del suolo durante i periodi piovosi. Al contrario, nei siti a carsificabilità alta o altissima, il suolo si prosciuga molto rapidamente e non rimane una riserva d'acqua sufficiente alle piante per affrontare eventuali condizioni ambientali avverse.

Fig. 3 – Area di studio (Provincia di Trieste).

In via preliminare, sono stati scelti 3 siti di indagine in modo tale da poter definire aree che potessero essere assunte a riferimento per le loro particolari caratteristiche ambientali. In queste tre stazioni di rilevamento, sono state eseguite misure replicate di campo diurne, stagionali ed annuali. Esse sono: la zona dei versanti di Monte Valerio (VA), l'ambiente di dolina nella zona di Borgo Grotta Gigante (DO) e infine la Cernizza di Duino (CE). Di seguito vengono fornite alcune informazioni relative alle caratteristiche ambientali di questi tre siti rappresentativi.

<u>Monte Valerio, Comune di Trieste, Provincia di Trieste</u>:

Questo sito, situato a 215 m s.l.m., comprende i versanti e le porzioni sommitali dei rilievi ai margini del centro di Trieste caratterizzati da un buon grado di naturalità dei boschi. Da un punto di vista geologico, in quest'area si succedono

situazioni strutturali e litologiche varie sia per l'alternanza di flysch a maggior componente arenacea che marnosa, sia per la varietà di assetto di stratificazione. La morfologia di Monte Valerio influenza profondamente le condizione edafiche ed ecologiche del sito. Sul pendio si instaura una condizione di equilibrio dinamico in cui c'è continuo apporto di materiali fini e composti alcalini dall'alto e una continua perdita degli stessi verso gli avvallamenti. Qui il suolo risulta poco acido e complessivamente poco evoluto, essendo costituito solo da pochi centimetri di terra ricca di scheletro al di sopra dello strato C di roccia madre. In questa zona le precipitazioni tendono a perdersi per ruscellamento superficiale, diminuendo la buona capacità idrica caratteristica di questi suoli (Poldini 1989).

La vegetazione forestale del Monte Valerio ha per protagonisti principali la rovere (*Quercus petraea*), che domina soprattutto la zona di basso pendio, la roverella (*Quercus pubescens*), che si concentra sull'alto pendio, e la carpinella (*Carpinus orientalis*) che si trova in frammenti nucleari. Le formazioni dell'alto pendio rientrano nell'*Ostryo-Quercetum pubescentis hieracetosum racemosi,* bosco climatofilo della serie delle arenarie, che rispetto a quello climatofilo della serie dei calcari e delle terre rosse si differenzia per una maggiore capacità di ritenuta idrica delle arenarie e marne. In questa zona sono abbondanti l'acero campestre (*Acer campestre*), l'olmo minore (*Ulmus minor*), il ligustro (*Ligustrum vulgare*) e la sanguinella (*Cornus sanguinea*), mentre nello strato erbaceo domina la sesleria d'autunno (*Sesleria autumnalis*). Nella zona di basso pendio, invece, vi è una presenza massiccia del pungitopo (*Ruscus aculeatus*), che sta ad indicare una maggiore condizione di umidità (Poldini 1989).

<u>Borgo Grotta Gigante, Comune di Sgonico, Provincia di Trieste</u>:

La dolina, che è un ambiente tipicamente carsico, è situata ad un'altitudine di 278 m s.l.m. Essa rappresenta una “depressione chiusa” ed ha tipicamente forma circolare e sezione a ciotola o imbuto, con fondo piatto. La dissoluzione delle rocce al fondo tende ad renderla più profonda, mentre il concorso della dissoluzione e della disgregazione tende ad aumentarne il diametro. Procedendo dal limite esterno della dolina verso il centro, si riscontra un'associazione di suoli che variano progressivamente per spessore, quantità di scheletro e grado di

erosione o accumulo. Numerosi sono i fattori che contribuiscono alla differenziazione del profilo di una dolina: litologia, suddivisione della massa rocciosa e suo assetto strutturale, entità e tipo di riempimento, meccanismo genetico di formazione. Il drenaggio delle acque si concentra verso il fondo della dolina, dove sono presenti le strutture verticali di drenaggio, detti punti idrovori (Forti 1982). In quest'area un fattore importante è la diversa esposizione dei versanti nord e sud da cui dipende una differente umidità, una diversa tessitura dei suoli nonché una differente distribuzione della vegetazione. Sul fondo della dolina il versante esposto a sud, si scalda maggiormente in quanto riceve i raggi diretti del sole ed è una zona caratterizzata prevalentemente da terra rossa sciolta, leggera, a cristalli poliedrici che permette una buona penetrazione dell'acqua in profondità. Su di esso si sviluppa il bosco carsico di rovere (*Seslerio-Quercetum petreae*) con uno strato erbaceo molto sviluppato. Il versante esposto a nord invece è più fresco e presenta una terra rossa compatta, pesante, non strutturata, argillosa e perciò ricca d'acqua. Il bosco carsico di questo versante rientra nell'associazione vegetale *Asaro-Carpinetumbetuli* ed è costituito quasi esclusivamente dal carpino bianco (*Carpinus betulus*), e in via subordinata dal nocciolo (*Corylus avellana*), dalla rovere (*Quercus petrea*) e dal tiglio selvatico (*Tilia cordata*), mentre il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) e il frassino (*Fraxinus ornus*) rimangono confinati ai margini (Poldini 1989). Nella dolina si viene a creare una condizione topoclimatica particolare, quasi a carattere continentale e di fondamentale importanza per l'interpretazione della vegetazione, nota come “inversione termica”. Scendendo verso il fondo della dolina, le temperature sono progressivamente minori: il gradiente di temperatura è pari a 7°C scendendo ogni 100 metri, ed esso è sensibilmente maggiore rispetto a quello di altitudine, che è di -0.6°C ogni 100 metri (Poldini et al. 1980).

<u>Cernizza, Comune di Duino Aurisina, Provincia di Trieste</u>:

L'ambiente della Cernizza è localizzato nell'ambito della macchia mediterranea costiera ad un altitudine di 20 m, dove è presente una vegetazione mediterranea extrazonale che di fatto rappresenta il limite di distribuzione settentrionale di questo tipo di vegetazione (Poldini et al. 1980). La macchia

mediterranea della Cernizza, chiamata *Orno-Quercetum ilicis*, è caratterizzata dalla dominanza del leccio (*Quercus ilex*) e dalla presenza di altre specie mediterranee quali la fillirea (*Phyllirea latifolia*), la fiammola (*Clematis flammula*) e l'edera spinosa (*Smilax aspera*). Dalla costa verso l'interno la macchia mediterranea lascia il posto ad una boscaglia termofila dominata dal frassino (*Fraxinus ornus*), dal carpino nero (*Ostrya carpinifolia*), dalla roverella (*Quercus pubescens*) e dallo scotano (*Cotinus coggygria*). Tutta la zona della Cernizza è posta in una posizione particolare, alle sorgenti del Timavo, dove si mescolano acque dolci e salate che riescono a penetrare nella fitta rete di fessure e fratture della roccia, costituita da strati di calcare sottili e fessurati. Ne consegue che vi è un elevato drenaggio delle acque meteoriche nel suolo e quindi una scarsa disponibilità d'acqua negli strati più superficiali. La Cernizza, inoltre, nel periodo estivo è caratterizzata da un'elevata evapotraspirazione a cui si associano alte temperature, che rendono il sito particolarmente arido (ERSA 2006).

6.3 Dati meteorologici

Durante il triennio 2005-2007 è stato consultato mensilmente il sito dell'OSMER (Osservatorio Meteorologico Regionale), che è il settore dell'ARPA-FVG (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia) preposto al monitoraggio e alla previsione meteorologica per il territorio del Friuli Venezia Giulia, per raccogliere i dati delle precipitazioni medie accumulate e delle temperature medie dell'aria relativi alla stazione meteorologica di Sgonico, scelta come rappresentativa della zona carsica. L'acquisizione dei dati meteoclimatici era necessaria ai fini dell'obiettivo di ricerca per rilevare i periodi di deficit pluviometrico e mettere in evidenza eventuali scostamenti dei parametri climatici delle medie relative al periodo 1961-1990.

6.4 Parametri che descrivono le relazioni pianta-acqua

6.4.1 Misura di conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), traspirazione (E_L) e potenziale dell'acqua fogliare (Ψ_{foglia})

Allo scopo di definire le relazioni pianta-acqua della specie biomonitor e valutare il suo comportamento in condizioni di limitazione edafica della disponibilità d'acqua, sono stati misurati i parametri fisiologici più strettamente correlati alle condizioni di deficit idrico dell'ambiente e cioè: massima conduttanza fogliare diurna al vapore acqueo (g_L), potenziale minimo diurno dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e potenziale dell'acqua della foglia prima dell'alba ($\Psi_{prealba}$). Questi parametri sono stati misurati nel periodo 2005-2006 su base diurna tra le 12:00 e le 14:00, ad eccezione di $\Psi_{prealba}$ che è stato misurato prima del sorgere del sole in modo tale da ottenere una stima del potenziale dell'acqua del suolo (Ψ_{suolo}). Nel 2006 questi parametri sono stati monitorati su base stagionale, ossia da Maggio a Settembre. In Maggio e in Giugno, nonostante la primavera sia caratterizzata da consistenti precipitazioni nel nostro territorio, le piante possono risentire di una talora consistente perdita di efficienza idraulica a causa di embolia vasale verificatasi nel periodo invernale e non ancora compensata. In Luglio e Agosto, solitamente l'aridità ambientale raggiunge i suoi massimi livelli, mentre in Settembre la pianta può ancora risentire a livello fisiologico del periodo arido appena trascorso.

Le misure di conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) sono state effettuate su foglie pienamente illuminate allo scopo di registrare i massimi valori di conduttanza fogliare al vapore acqueo che possono essere raggiunti dall'orniello in ogni area di studio. Essa veniva rilevata su almeno 5 foglie diverse di almeno 3 alberi per sito. Le misure venivano effettuate in campo utilizzando un porometro a stato stazionario (LI-1600 Steady-State Porometer, LI-COR, inc. Lincoln, NE, USA), che è uno strumento impiegato in molte ricerche a carattere ecofisiologico in quanto fornisce dati di buona qualità. Grazie al porometro, la misura viene eseguita in modo non distruttivo, quindi è possibile rilevare con precisione in situ ciò che avviene *in planta*. Tramite questo strumento si

ottengono fondamentalmente un numero elevato di rapide misure (ciascuna misura ha la durata di circa 30 s) di tasso traspiratorio (E_L, mmol m^{-2} s^{-1}) e conduttanza fogliare al vapore d'acqua (g_L, mmol m^{-2} s^{-1}). Lo strumento è dotato di una camera aperta in cui viene fissata una porzione di foglia di 2 cm^2 di superficie. Nella camera sono presenti: un sensore di umidità relativa dell'aria (RH, %), l'ingresso per un flusso d'aria seccata tramite gel di silice, un termometro per la temperatura della foglia (T_{foglia}, °C), uno per la temperatura della camera (T_{camera}, °C). L'operatore misura e memorizza innanzitutto l'umidità relativa dell'aria nelle vicinanze della pianta, fissa quindi la foglia allo strumento e l'umidità all'interno della camera aumenta, in conseguenza della traspirazione fogliare. Lo strumento a questo punto immette un flusso controllato di aria secca, tale da riportare l'umidità nella camera ad un valore pari a quello dell'aria esterna. Lo strumento calcola quindi il tasso traspiratorio della foglia (E_L, mmol m^{-2} s^{-1}) tramite la seguente equazione:

$$E_L = (\rho_c - \rho_a) \cdot f / a$$

In cui: ρ_C (mmol cm^{-3}) è la densità di vapore d'acqua misurata nella camera; ρ_A (mmol cm^{-3}) è la densità di vapore acqua dell'aria secca immessa, assunta con una umidità relativa del 2%; f (cm^3 s^{-1}) è il flusso di tale aria secca immessa; a (m^2) è l'area pinzata della foglia. Le densità di vapore d'acqua sono calcolate a partire dai valori misurati di umidità relativa, temperatura e pressione atmosferica (quest'ultima impostata dall'operatore). Lo strumento calcola poi la conduttanza fogliare al vapore d'acqua (g_L, mmol m^{-2} s^{-1}) tramite la seguente equazione:

$$g_L = E_L \cdot \frac{P}{e_L - e_C}$$

dove P (kPa) è la pressione atmosferica (impostata dall'operatore); e_L (kPa) è la pressione parziale del vapore d'acqua nel mesofillo, assumendo che lì

l'umidità relativa sia del 99%; e_C (KPa) è la pressione del vapore d'acqua misurata nella camera. Anche in questo caso le pressioni parziali di vapore d'acqua sono calcolate a partire dai valori di umidità relativa, temperatura e pressione atmosferica. Lo strumento è dotato inoltre di un sensore per la misura della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR, μmol m^{-2} s^{-1}).

Il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) veniva facilmente e rapidamente misurato in laboratorio con una bomba a pressione (Scholander et al. 1965) su almeno 6 foglie prelevate da rami di almeno 3 alberi per ogni area di studio. In campo le foglie venivano avvolte in una pellicola di plastica, recise dalla pianta e successivamente inserite in buste di plastica a chiusura ermetica, all'interno delle quali veniva collocato preventivamente un foglio di carta bibula umida allo scopo di creare un ambiente interno saturo di vapore acqueo ed evitare eventuali perdite d'acqua da parte della foglia. I campioni raccolti venivano riposti in una borsa frigo e trasportati in laboratorio non appena concluse le misure fisiologiche di campo. Il campione veniva poi inserito nel cilindro della bomba a pressione con la superficie di taglio sporgente all'esterno. Per misurare con precisione il potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}), all'interno della camera cilindrica veniva preventivamente introdotto un foglio di carta bibula umida per minimizzare la traspirazione.

6.4.2 Misura delle isoterme del potenziale dell'acqua fogliare (Ψ_{foglia})

La bomba a pressione non consente solamente di effettuare misure puntiformi, ma anche di analizzare le variazioni dei componenti del potenziale dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) in funzione dello stato di idratazione dei tessuti. Si è ritenuto quindi che l'analisi delle isoterme del potenziale dell'acqua della foglia (o curve pressione-volume) potesse essere una metodologia utile a comprendere possibili meccanismi di adattamento all'aridità nell'orniello. Queste misure sono state effettuate nei mesi di Maggio-Giugno e Luglio-Agosto 2007 su almeno tre campioni nei tre siti rappresentativi di San Pelagio, Monte Valerio e Cernizza. Le foglie venivano raccolte in campo la sera precedente l'esperimento e trasportate

in laboratorio dove venivano avvolte in una pellicola di plastica per minimizzare la traspirazione. Esse venivano quindi reidratate completamente (cioè fino a pieno turgore) per tutta la notte immergendo la sezione di taglio di ogni picciolo in un beaker di acqua distillata. Le curve pressione-volume (P-V) venivano quindi eseguite per mezzo di una camera a pressione secondo la tecnica descritta da Scholander et al. (1965) e da Tyree & Hammel (1972). La curva pressione-volume ha una forma caratteristica: la prima parte è curvilinea concava decrescente, la seconda è decrescente rettilinea (Boyer 1995; Salleo 1995). Nella prima parte, infatti, osserviamo la caduta di potenziale dovuta alla contemporanea diminuzione della pressione di turgore (P_t) e del potenziale osmotico (π). Quando la quantità di acqua persa è tale che le cellule raggiungono il punto dell'incipiente plasmolisi, la pressione di turgore si riduce a zero ($P_t = 0$). Da questo punto in poi osserviamo solamente la caduta di potenziale osmotico all'interno delle cellule e la curva P-V assume andamento rettilineo. In laboratorio, la foglia veniva innanzitutto inserita nella camera e fissata a tenuta per mezzo di guarnizioni, con la superficie di taglio sporgente all'esterno. Successivamente la foglia veniva sottoposta ad una disidratazione progressiva e controllata, a temperatura costante, durante la quale si registravano le variazioni del contenuto d'acqua e del potenziale dell'acqua della foglia stessa. Si procedeva quindi in tal modo finché non veniva raggiunto il punto di perdita di turgore. I parametri derivati da questo tipo di analisi erano: il potenziale osmotico a pieno turgore (π_0), il potenziale al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}) e il modulo di elasticità delle pareti cellulari (ε_{max}, Tyree & Hammel 1972; Salleo & Lo Gullo 1990).

Il potenziale osmotico a pieno turgore (π_0), che rappresenta la concentrazione di soluti nelle cellule della foglia in condizioni ottimali, ossia a pieno turgore, può fornire informazioni relative ad eventuali processi di osmoregolazione in risposta ad uno stress idrico se confrontato su diversi periodi di tempo. In condizioni di aridità, infatti, è stata spesso osservata una diminuzione del potenziale osmotico cellulare in seguito alla attiva accumulazione di soluti all'interno delle cellule per riuscire a mantenere il turgore e l'espansione cellulare (Cheung et al. 1975). In alcuni studi è stato riscontrato che nell'orniello (*Fraxinus*

ornus L.) il malato e il mannitolo sono i principali soluti attivi la cui concentrazione aumenta nei tessuti fogliari in risposta allo stress idrico (Oddo et al. 2002a; Oddo et al. 2002b). Tale accumulo è stato osservato anche in altre specie appartenenti al genere *Fraxinus*, quali *Fraxinus excelsior* L. e *Fraxinus angustifolia* Vahl. (Marigo & Peltier 1996; Peltier et al. 1997; Guicherd et al.1997; Patonnier et al. 1999).

Il potenziale al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}) corrisponde al punto del potenziale a cui si azzera il turgore e rappresenta una condizione critica per la pianta, in quanto viene bloccato l'accrescimento.

Il modulo di elasticità delle pareti cellulari (ε_{max}) esprime la pendenza della prima parte della curva P-V (in cui $P_t > 0$) da cui: $\varepsilon_{max} = dP_t/dV \cdot V_0$. ε_{max} è dunque la variazione della pressione di turgore (dP_t) riferito al volume d'acqua fuoriuscito dalla foglia (dV) con il metodo della bomba a pressione, moltiplicato per il massimo volume d'acqua in essa contenuta (V_0). Più rigide sono le pareti cellulari, cioè più grande è ε_{max}, maggiore è la caduta di P_t , e quindi di Ψ, per piccole quantità d'acqua persa (senza che avvengano variazioni di Ψ_{osm}) e ciò garantisce una maggiore forza traente per il prelievo d'acqua dal suolo (Salleo 1983). Il modulo di elasticità delle pareti cellulari (ε_{max}) è quindi un parametro di fondamentale interesse per la comprensione di fenomeni adattativi di specie xeromorfiche allo stress idrico (Salleo 1995).

6.4.3 Misure della conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia})

La conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) è stata misurata in laboratorio su almeno 5 foglie di almeno 3 alberi per sito utilizzando un flussometro ad alta pressione (High Pressure Flow Meter, HPFM). L'HPFM è uno strumento che permette la misura della conduttanza idraulica (K) di organi vegetali quali fusti, radici e foglie. Essenzialmente lo strumento è costituito da una sorgente di acqua pressurizzata, un sistema di capillari collegati a trasduttori di pressione e un tubo di collegamento che permette di collegare l'oggetto da misurare allo strumento. Il sistema si basa sulla misura del rapporto tra la differenza di pressione (ΔP) che si

instaura tra l'oggetto che viene misurato e la sorgente di acqua che viene forzata nello stesso, ed il flusso di acqua (F) che viene indotto nell'oggetto stesso. In tal modo, la conduttanza idraulica (K) viene ricavata dalla semplice relazione $K = F/\Delta P$. Nella presente ricerca, la conduttanza idraulica delle foglie è stata misurata nella modalità “quasi steady state”, così denominata perché durante la misura il flusso dell'acqua e la pressione applicata sono “quasi” costanti. Di fatto, è praticamente impossibile mantenere un'assoluta stazionarietà dei due parametri, a causa delle particolari caratteristiche dei sistemi biologici, perciò la conduttanza viene definita in una condizione di “quasi” stazionarietà. Per definizione, in condizioni di “steady state” o di equilibrio dinamico, la quantità di acqua affluente in un oggetto è uguale a quella effluente da esso ed è proprio questo il principio su cui si basa il funzionamento dell'HPFM. Nel caso delle foglie, lo strumento viene collegato al picciolo, nel quale viene poi forzata acqua pressurizzata. Prima di entrare nella foglia attraverso il picciolo, l'acqua attraversa un sistema di tubi capillari che possiedono resistenza idraulica nota (R_{ct}), in base alla quale è possibile calcolare il flusso di acqua che attraversa il capillare tramite la misura della caduta di pressione alle due estremità del capillare (dP) cioè:

$$F = dP / R_{ct}$$

Poiché il flusso del capillare di resistenza R_{ct} è uguale al flusso nell'oggetto, è possibile calcolare la resistenza idraulica ignota della foglia (R_{foglia}) se è nota la differenza di pressione idrostatica alle due estremità (picciolo e superficie fogliare dove l'acqua esce attraverso gli stomi):

$$R_{foglia} = (P_2 - P_0) / F$$

dove P_2 è la pressione registrata da un trasduttore di pressione posto all'uscita del capillare e quindi in corrispondenza al punto di ingresso dell'acqua nel picciolo, mentre P_0 è la pressione dell'acqua in uscita dalla foglia, ossia la pressione atmosferica, assunta al valore relativo di zero. Se la pressione P_0 non fosse nota, non sarebbe possibile calcolare la resistenza incognita. È pertanto di fondamentale importanza far sì che la foglia si trovi sullo stesso piano dei trasduttori di pressione in modo da evitare l'introduzione di componenti di

pressione idrostatica dell'acqua non desiderate e determinate dalla gravità. Se P_0 = 0, allora:

$$R_{ct} \cdot F = dP$$

$$R_{foglia} \cdot F = P_2$$

Da queste equazioni deriva che

$$R_{foglia} = R_{ct} \cdot (P_2 / dP)$$

che è la formula utilizzata dal software di controllo dell'HPFM per calcolare la resistenza idraulica della foglia.

Durante le misure di resistenza idraulica per mezzo dell'HPFM, la foglia viene a trovarsi in condizioni sostanzialmente differenti da quelle in vivo. Infatti, l'acqua pressurizzata che viene forzata nella foglia determina l'infiltrazione degli spazi intercellulari, normalmente pieni d'aria. Inoltre, l'acqua esce dalla foglia attraverso gli stomi in forma liquida, mentre in vivo la perdita d'acqua attraverso gli stomi ha luogo in fase gassosa (vapore acqueo). Queste considerazioni hanno recentemente sollevato dubbi sulla validità del metodo per la misura delle caratteristiche della foglia. Le critiche rivolte alla tecnica dell'HPFM hanno stimolato ulteriori ricerche nelle quali il metodo è stato posto a confronto con altre metodologie di misura della resistenza idraulica della foglia indipendenti tra le quali ad esempio la camera a vuoto (Kolb et al. 1996). In tutti i casi è stato possibile verificare che l'HPFM misura correttamente la conduttanza idraulica della foglia, producendo valori vicini a quelli che sono stati registrati in vivo (Tsuda & Tyree 2000; Nardini et al. 2001).

Nel presente studio la foglia, collegata all'HPFM attraverso il picciolo utilizzando connessioni a compressione, veniva quindi infiltrata con acqua degassata e filtrata a 0.1 µm, ad una pressione di 0.1-0.3 MPa. Il flusso risultante veniva registrato ogni 16 s, quindi veniva registrata la resistenza idraulica (R_{foglia}) e conseguentemente la conduttanza idraulica (K_{foglia}=1/R_{foglia}). Durante le fasi iniziali della misura la resistenza idraulica (R_{foglia}) aumentava gradualmente come probabile effetto della progressiva reidratazione e infiltrazione della foglia. La misura proseguiva fintanto che i valori di R_{foglia} non si stabilizzavano, cioè fino a

quando la deviazione standard della media delle ultime 20 misure non diventava minore del 2% della media, ciò che richiedeva da 20 a 30 minuti a seconda della foglia analizzata.

6.5 Misure morfoanatomiche

Allo scopo di caratterizzare la specie bioindicatore da un punto di vista morfoanatomico, sono stati misurati i seguenti parametri: area fogliare (A_{foglia}), peso secco fogliare (PS), superficie fogliare specifica (SLA), diametro medio e lunghezza media dei vasi xilematici del fusto.

Innanzitutto è stata misurata l'area fogliare (A_{foglia}) di almeno 9-10 foglie prelevate da 3 alberi diversi per ognuna delle 21 aree di studio utilizzando un misuratore di area fogliare (LI-3000A, LiCor Inc., Lincoln, NE, USA). Ciascuna foglia veniva numerata e quindi posta in stufa ad una temperatura di 70°C per tre giorni. Alla fine di questo periodo, le foglie venivano trasferite in un essiccatore e quindi venivano pesate per mezzo di una bilancia elettronica (Sartorius mod. Basic BA110S) allo scopo di ottenere la misura del loro peso secco (PS). L'area specifica fogliare (SLA) veniva quindi calcolata come SLA = A_{foglia}/PS ed espressa in m^2/kg^{-1}.

Poiché la capacità di approvvigionamento idrico dell'apparato fogliare dipende in gran parte dall'efficienza del sistema xilematico lungo il fusto, si è proceduto ad esaminare l'anatomia del sistema vascolare nei due gruppi di aree di studio. Al fine di ottenere informazioni corrispondenti alla produzione vascolare del 2006, per ognuna delle 21 aree di studio sono state ricavate sezioni trasversali dalla parte mediana di rami di due anni. I campioni sono stati così fissati in formaldeide al 40%. Le sezioni sono state ottenute utilizzando una lametta e successivamente sono state montate su un vetrino portaoggetti per mezzo di uno sottile strato di glicerina. Almeno tre sezioni per ogni sito, ricavate da rami raccolti da 3 alberi diversi, sono state osservate e fotografate per mezzo di uno stereo-microscopio, dotato di macchina digitale (Leica DC300), ad un ingrandimento pari a 32x e analizzate successivamente utilizzando un programma di analisi di immagini (Image J 1.37v).

In alcuni siti rappresentativi (San Pelagio, Monte Valerio, Casa Romana, Cernizza) è stata inoltre misurata la lunghezza media dei vasi xilematici, o più precisamente è stata calcolata la distribuzione dei vasi xilematici nelle varie classi di lunghezza relative alla produzione vascolare dell'anno 2006. La tecnica utilizzata è stata quella proposta recentemente da Sperry et al. (2005). I campioni venivano infiltrati con una componente siliconica (Rhodorsil RTV-141, Rhodia, Cranbury, NJ) combinata ad un pigmento blu (Pentasol, Prochima, Pesaro, Italy) per mezzo della bomba a pressione, ad una pressione di 0.5 MPa per 3 ore. La componente siliconica non penetra attraverso le pareti terminali dei vasi xilematici e quindi fornisce informazioni affidabili sulla loro lunghezza e distribuzione. I campioni venivano messi in stufa alla temperatura di 70°C per all'incirca un'ora, dopodiché essi venivano lasciati asciugare all'aria per almeno 12 ore, che era il tempo necessario a far indurire la componente siliconica all'interno dei fusti. Successivamente si procedeva a tagliare i rami così preparati circa ogni 0.5 -1.0 cm dalla base infiltrata e in ogni sezione trasversale ricavata veniva contato il numero dei vasi xilematici che erano stati riempiti dal silicone blu. Il conteggio dei vasi xilematici colorati veniva in seguito convertito in una distribuzione di lunghezze utilizzando due formule matematiche. La prima formula applicata è una funzione a decadimento esponenziale: $N_L = N_0\, e^{(-kL)}$ dove N_0 è il numero di condotti xilematici corrispondente alla superficie di infiltrazione; N_L è il numero di vasi xilematici che risultano colorati alla distanza L (cm) dalla superficie di infiltrazione e k è il coefficiente di estinzione. Per stimare quindi la frequenza di distribuzione dei vasi xilematici all'interno delle varie classi di lunghezza è stata applicata la seguente formula: P_{LC} (%)= $N_0 \cdot [-(1+k\cdot L_2)\cdot e^{(-k\cdot L2)}+(1+\ k\cdot)\cdot e^{(-k\cdot L1)}\ ]$ dove L_1-L_2 (cm) rappresenta una determinata classe di lunghezza e k è il coefficiente di estinzione calcolato dalla funzione a decadimento esponenziale.

Tenendo conto del principio di Hagen-Poiseuille, secondo il quale l'efficienza di un condotto cilindrico al trasporto dell'acqua dipende in modo critico dalla quarta potenza del suo raggio, è stata inoltre stimata la conduttività idraulica teorica del sistema xilematico del fusto nei rami di due anni. Per i due gruppi di aree di studio è stata quindi calcolata $K_{teorica}$ secondo la formula:

$$K_{teorica} = \frac{\sum r^4 \pi}{8 \eta}$$

dove r (μm) è il raggio medio del vaso xilematico e η (Pa·s) è la viscosità dinamica dell'acqua.

6.6 Metodologie aggiuntive applicate: Telerilevamento

Con l'appoggio del Laboratorio di Telerilevamento dell'Università degli Studi di Trieste è stato possibile disporre di un'immagine telerilevata, relativa al territorio della Provincia di Trieste, acquisita dal sensore MODIS. L'elaborazione di questa immagine ha permesso di calcolare l'indice di vegetazione LSWI (Land Surface Water Index) (Xiao et al. 2002; Xiao et al. 2004).

Il sensore multispettrale e multiangolare MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) è montato sui satelliti Terra (EOS-AM 1) e Acqua (EOS-PM 1), entrambi concepiti nell'ambito del programma EOS (Earth Observation System) e messi in orbita nel dicembre 1999 e nel maggio 2002. Acqua passa sull'Italia alle 1:30 e alle 13:30 e i suoi passaggi sono complementari a quelli del satellite Terra che passa alle 10:30 e alle 22:30. Questo sistema risulta vantaggioso in quanto, alle nostre latitudini, permette di avere a disposizione per la stessa zona immagini giornaliere. Il sensore MODIS rappresenta lo strumento chiave a bordo dei due sistemi satellitari ma in realtà Acqua trasporta altri sei strumenti complementari e Terra cinque, tra i quali ricordiamo l'ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) e il MISR (Multiangle Imaging SpectroRadiometer). Il sensore MODIS apprezza 36 bande spettrali di cui le prime 7 sono designate in particolare per lo studio della vegetazione e della superficie terrestre. Le prime due bande (rosso a 0.62-0.67 μm e NIR a 0.841-0.876 μm) sono acquisite a 250 m, mentre le successive 5, blu (0.459-0.479 μm), NIR (1.23-1.25 μm) e SWIR (1.628-1.652; 2.105-2.155 μm) sono acquisite a 500 m. Tutte le altre bande hanno una risoluzione di 1000 m. Le immagini sono gratuite e scaricabili direttamente dalla

rete assieme ad una serie di prodotti specifici, suddivisi in Atmosphere, Land e Ocean, ottenuti dai dati grezzi originali. L'indice utilizzato in questa ricerca appartiene alla serie Land.

Uno studio recente (Kim et al. 2004) effettuato sulle comunità vegetali che crescono nelle zone semiaride localizzate in prossimità del fiume San Pedro (Messico) ha dimostrato che l'indice LSWI è affidabile nel monitoraggio su base stagionale e annuale dello stress idrico da aridità e permette di mettere in evidenza la riduzione nella produttività della vegetazione. In un recente lavoro (Altobelli et al. 2007) è stata verificata la validità di alcuni indici di vegetazione elaborati da immagini provenienti dal sensore MODIS, tra i quali l'indice LSWI, e finalizzati allo studio della vegetazione nel territorio del Friuli Venezia Giulia. Mediante incrocio con la mappa dei Sistemi Ecologici (1:250.000) e la carta delle Tipologie Forestali (1:25.000) è stato dimostrato che, nonostante la bassa risoluzione del satellite MODIS, gli indici elaborati risultano essere sensibili alle variazioni territoriali presenti nel paesaggio. Grazie ai sensori multispettrale e multiangolare, MODIS è quindi in grado di discriminare con sufficiente sensibilità le tipologie forestali presenti su un'area territoriale eterogenea come il Friuli-Venezia Giulia. In particolar modo si è rivelato in grado di stimare la fotosintesi netta attraverso un monitoraggio continuo della vegetazione.

L'immagine utilizzata, acquisita dal sensore MODIS, risultava essere già georiferita, corretta atmosfericamente per eliminare l'effetto additivo dovuto all'atmosfera, e topograficamente per eliminare l'effetto dovuto alla diversa morfologia del terreno. È stato quindi calcolato l'indice LSWI la cui formula è:

$$LSWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Come è già stato scritto nella Parte Generale, tale indice è simile nella formula matematica all'NDWI, ma usa la banda 2 (0.841 μm - 0.875 μm) dell'infrarosso vicino (NIR – near infrared reflectance) e la banda 6 (1.628 μm - 1.652 μm) dell'infrarosso a lunghezza d'onda breve (SWIR – short wave infrared

reflectance). Tale indice di vegetazione, che è sensibile al contenuto d'acqua nelle foglie e all'umidità del suolo, è stato correlato ai dati di campo ottenuti nelle 21 stazioni di campionamento. Poiché il sensore MODIS ha una risoluzione temporale giornaliera, la data dell'immagine telerilevata coincideva con il giorno in cui sono state effettuate le misure dei parametri fisiologici relativi alle relazioni pianta-acqua.

7 Risultati

7.1 Andamento climatico/meteorologico negli anni di studi

In Fig. 1 è riportato l'andamento delle temperature medie e delle precipitazioni mensili negli anni 2005, 2006 e 2007 mentre in Fig. 2 sono riportati i medesimi parametri nel trentennio 1961-1990, misurati nella stazione meteorologica dell'Università degli studi di Trieste situata presso l'Area di Ricerca di Padriciano (Carso triestino). È possibile notare che la media delle temperature di Gennaio 2007 era consistentemente più elevata rispetto a quella dei due anni precedenti (circa 8°C vs. 2-5°C, Fig. 1) ma in linea con quella del periodo 1961-1990. È invece impressionante la irregolarità delle precipitazioni nei tre anni di studio, con minimi estremamente bassi (10-50 mm) nel mese di Giugno (solitamente assai piovoso, Fig. 2). Altri mesi privi o quasi di precipitazioni sono stati Gennaio-Febbraio 2005, Giugno-Luglio 2006 e soprattutto l'autunno degli anni 2006-2007 (Fig. 1), dati tutti, questi, in evidente discrepanza con la media trentennale di Fig. 2.

7.2 Parametri che descrivono le relazioni pianta-acqua: (g_L, Ψ_{foglia}, K_{foglia})

7.2.1 *Misure su base diurna, stagionale ed annuale nei siti rappresentativi di Monte Valerio, dolina di Borgo Grotta Gigante e Cernizza*

Nel 2005 le misure relative alla massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) e al potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) rilevati nei tre siti rappresentativi di Monte Valerio, dolina di Borgo Grotta Gigante e Cernizza (Fig. 3) sono state completate in un unico ciclo nel mese di Giugno in quanto, a causa del gran numero di giorni piovosi durante il periodo estivo, non è stato possibile acquisire un ulteriore set di dati per questi parametri (Fig.1a). Per quanto riguarda g_L, a Giugno si osservava una significativa differenza tra i tre siti. I dati sottoposti al Test di Student evidenziavano una elevata significatività della differenza per $P<0.001$. I valori di g_L raggiungevano un livello massimo di 68 mmol m^{-2} s^{-1} nel

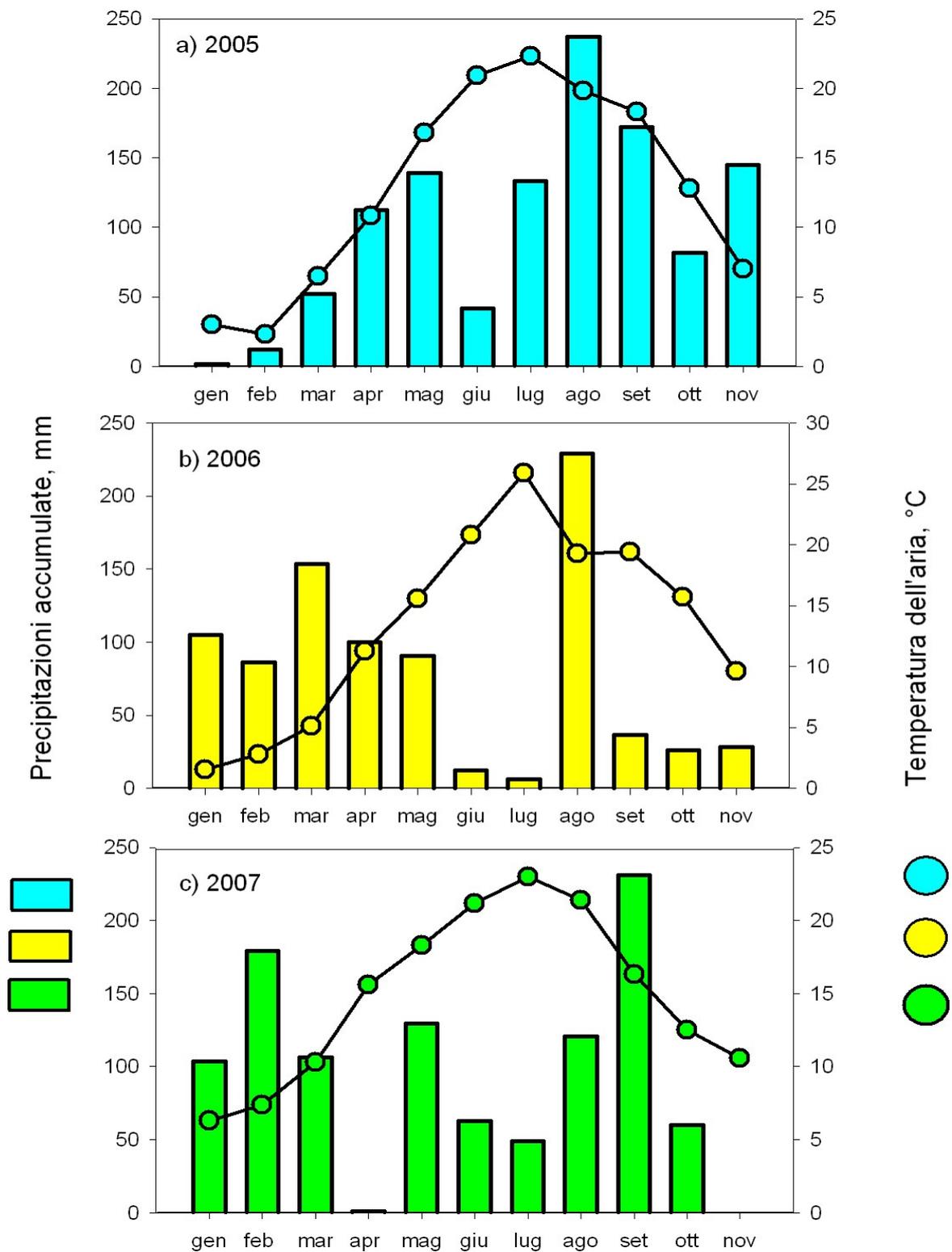



Fig. 1 – Andamento medio delle precipitazioni accumulate e della temperatura dell'aria nel 2005 (a), 2006 (b) e 2007 (c) - Stazione meteorologica di Sgonico, OSMER, ARPA-FVG.

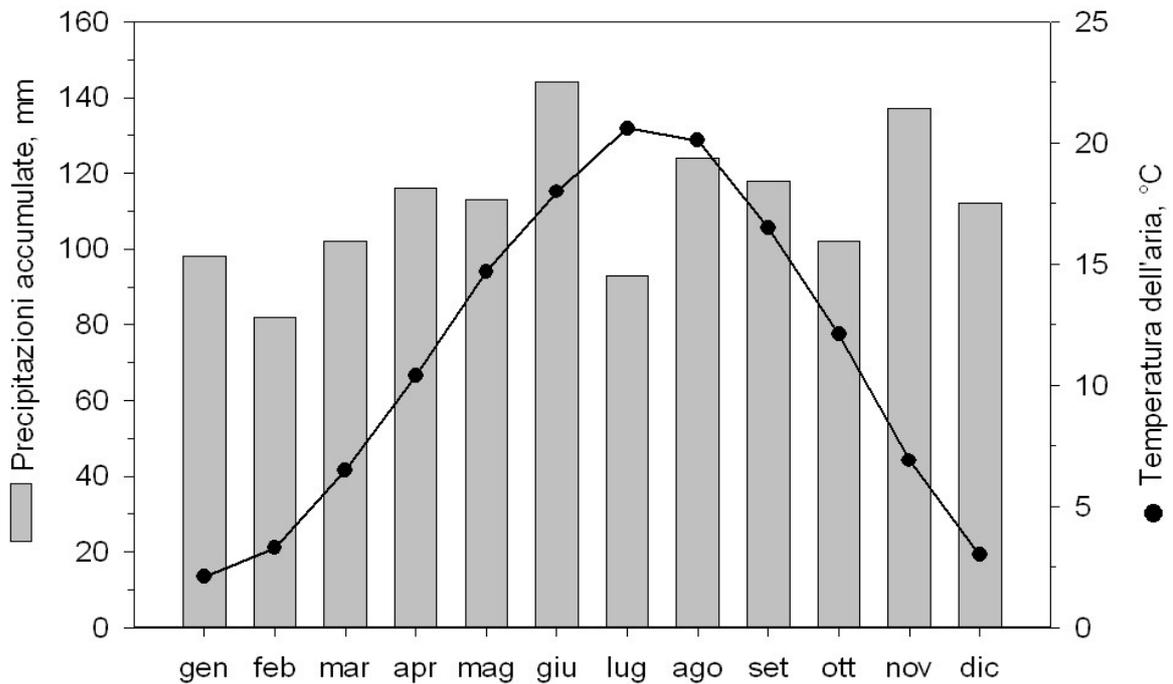



Fig. 2 – Valori medi delle precipitazioni accumulate (mm) e delle temperature dell'aria (°C) relativi al periodo 1961-1990 (Stazione meteorologica dell'Area di Ricerca di Padriciano, Sezione di Oceanografia e Meteorologia - Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Trieste).

sito di Monte Valerio, caratterizzato da bassa carsificabilità e decrescevano sensibilmente fino a raggiungere, nei siti di dolina di Borgo Grotta Gigante e della Cernizza caratterizzati entrambi da alta carsificabilità, i livelli minimi rispettivamente di 27.6 e 23 mmol m^{-2} s^{-1}. Tali valori corrispondevano ad una conduttanza più o meno di livello cuticolare. Ψ_{foglia} mostrava il valore più negativo (-2.4 MPa) nel sito della Cernizza con un decremento del 25% rispetto agli altri due siti. Ciò che evidenziava una situazione di maggiore stress nel sito della Cernizza. In questo mese, infatti, le piogge erano state insolitamente scarse, si aggiravano cioè attorno a 40 mm (Fig. 1a) contro all'incirca 140 mm della media del periodo (Fig. 2). Il potenziale dell'acqua fogliare, tuttavia, non mostrava differenze fra siti diversi per carsificabilità se non per quello della Cernizza che è anche il sito a minore altitudine s.l.m.

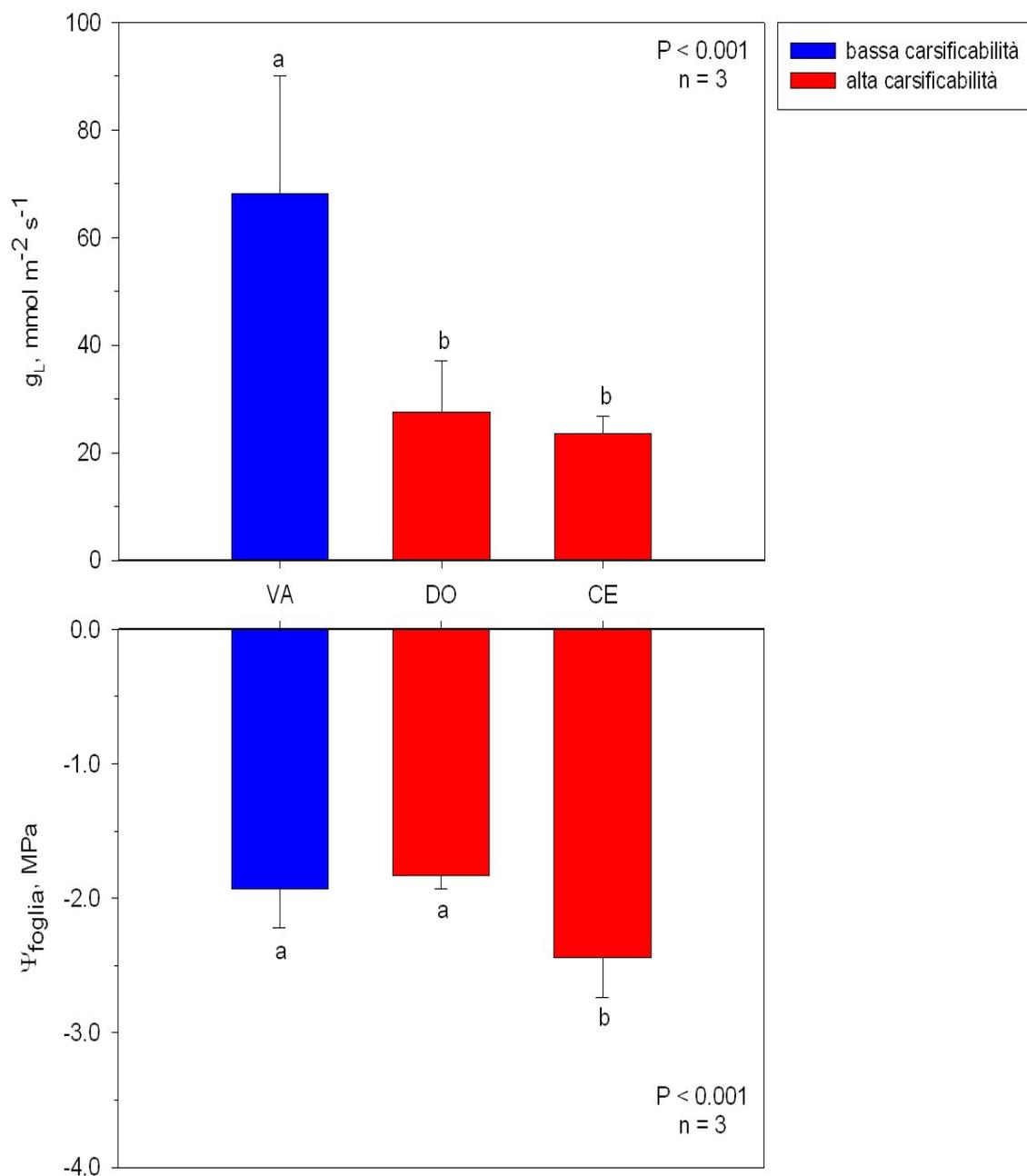



Fig. 3 – Massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) e potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) registrati a Giugno 2005 nei tre siti rappresentativi:

VA – Monte Valerio
DO – Dolina (Borgo Grotta Gigante)
CE – Cernizza

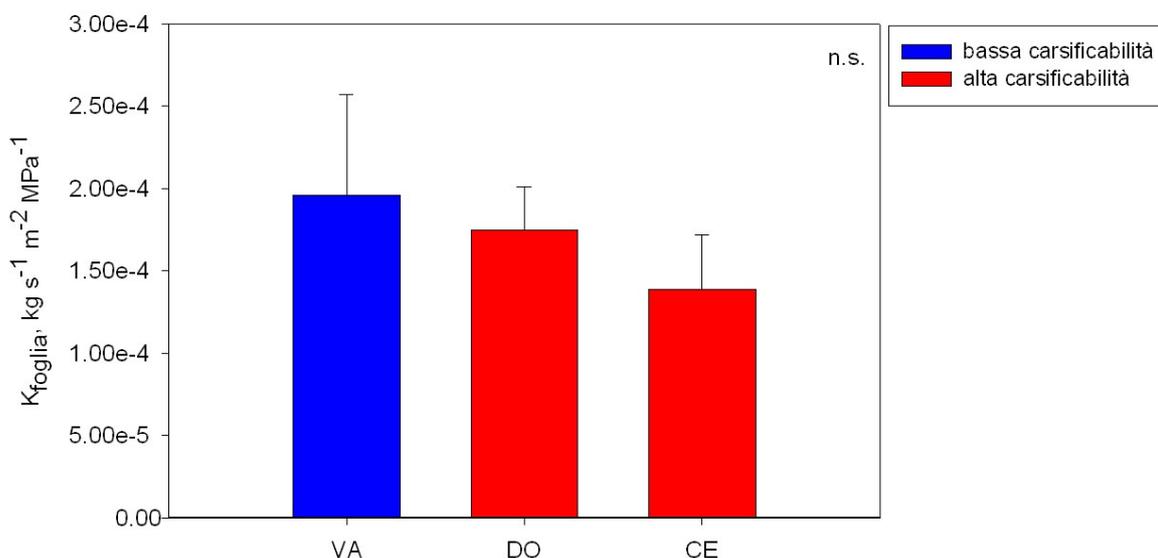



Fig.4 - Conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) misurata a Luglio 2005 nei tre siti rappresentativi.

A Luglio 2005 è stata misurata la conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) nei tre siti rappresentativi (Fig. 4). Per questo parametro era possibile notare una tendenziale progressiva riduzione del suo valore a partire dal sito a bassa carsificabilità di Monte Valerio in cui si registrava il valore più elevato (1.96×10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1}) verso il sito ad alta carsificabilità della Cernizza, in cui invece il valore di K_{foglia} risultava più basso di circa il 30% (1.39×10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1}). Non era però possibile apprezzare alcuna differenza statisticamente significativa fra le medie dei valori nei vari siti in funzione della capacità di drenaggio del suolo.

L'andamento di g_L, Ψ_{foglia} e $\Psi_{prealba}$ su base stagionale (da Maggio a Settembre 2006) nei siti rappresentativi di Monte Valerio, dolina di Borgo Grotta Gigante e Cernizza è riportato in Fig. 5.

A Maggio, g_L variava fra 90 e 100 mmol m^{-2} s^{-1} nei tre siti con valori di Ψ_{foglia} poco negativi, compresi tra -0.9 MPa nel sito della dolina di Borgo Grotta Gigante e -1.4 MPa nel sito della Cernizza. Anche i valori di $\Psi_{prealba}$ erano assai elevati e si aggiravano attorno a -0.5 MPa in tutti e tre i siti. Le frequenti piogge verificatesi in questo mese (Fig. 1b) avevano quindi rifornito di acqua il suolo in tutti e tre i siti

studiati.

In Giugno, per effetto delle precipitazioni meteoriche di Maggio (Fig. 1b) g_L aumentava in tutti e tre i siti e in particolare modo nel sito di Monte Valerio dove essa raggiungeva il valore massimo di 131.7 mmol m^{-2} s^{-1}, mentre Ψ_{foglia} e $\Psi_{prealba}$ presentavano valori sostanzialmente simili a quelli registrati a Maggio.

Nel mese di Luglio, le temperature dell'aria, per 25 giorni su 31, avevano superato i 30°C (OSMER-FVG). Inoltre, la scarsità di precipitazioni estiva iniziata già ai primi di Giugno era proseguita fino alla fine del mese (Fig. 1b). In queste condizioni, g_L veniva sostanzialmente ridotta in tutti e tre i siti a valori di conduttanza pressoché cuticolare. Nel sito di Monte Valerio veniva, infatti, registrato un valore di g_L pari a 23.8 mmol m^{-2} s^{-1}, mentre nel sito della Cernizza il valore di questo parametro era ancora più basso, pari a 8.4 mmol m^{-2} s^{-1}. Parallelamente Ψ_{foglia} scendeva a valori fortemente negativi, attorno a -3.5 MPa, nel sito di Monte Valerio (VA) e in quello della Cernizza (CE). Al contrario, nel sito della dolina di Borgo Grotta Gigante (DO) tale parametro non mostrava una analoga caduta ma si manteneva attorno a -2.0 MPa. È particolarmente importante notare che $\Psi_{prealba}$ era praticamente identico a Ψ_{foglia} sia nel sito di Monte Valerio che in quello della Cernizza, ciò che indicava che il suolo in queste due aree si era completamente prosciugato e Ψ_{max} ($\approx\Psi_{suolo}$) era diventato costantemente uguale a Ψ_{min}. Nel sito della dolina di Borgo Grotta Gigante, la caduta di potenziale ($\Delta\Psi=\Psi_{prealba}-\Psi_{foglia}$) è stata sorprendentemente piccola ma comunque significativa (da 0.5 e -1.3 MPa).

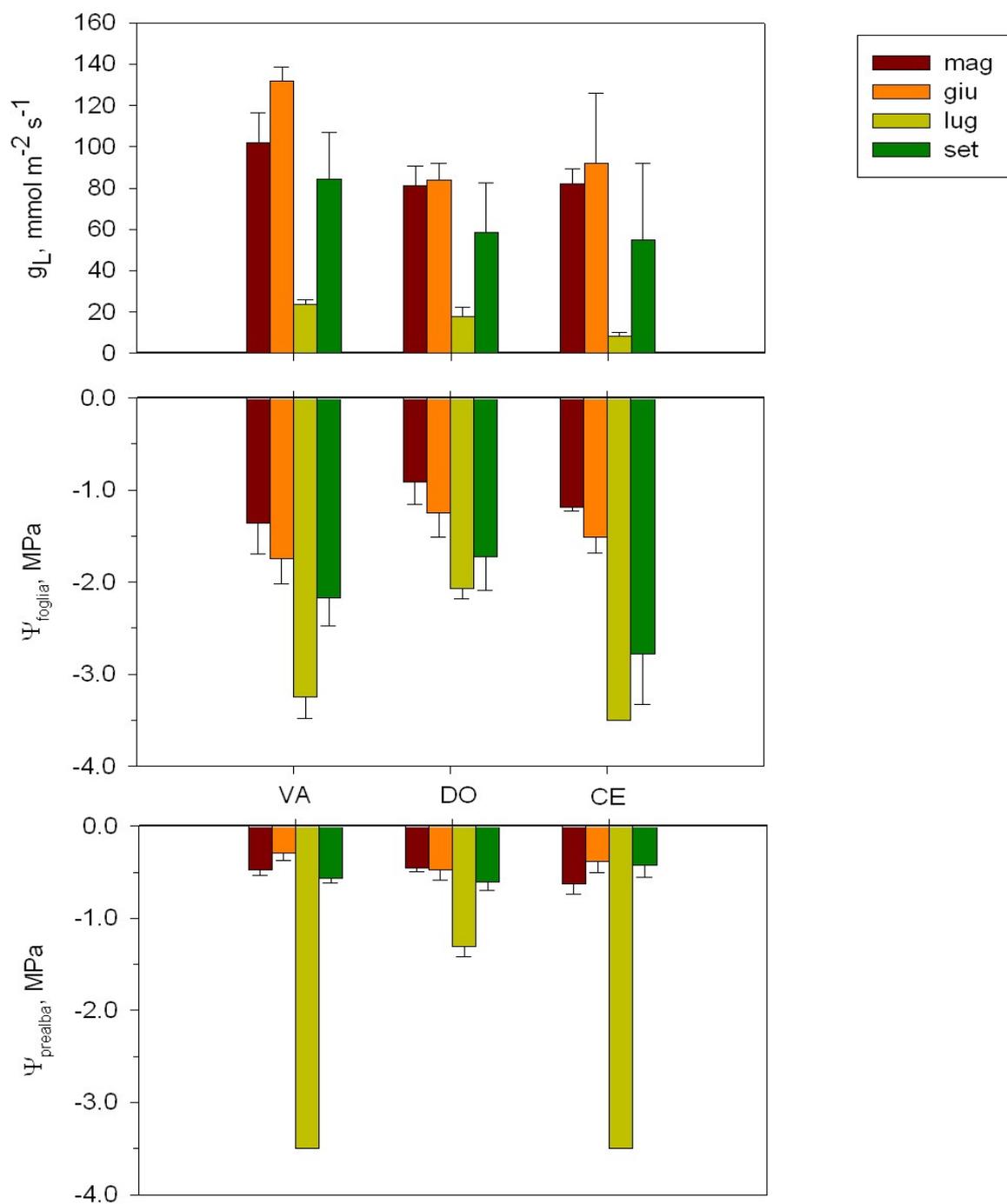



Fig. 5 – Andamento stagionale della massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), del potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e del potenziale dell'acqua della foglia prima dell'alba ($\Psi_{prealba}$) misurati nei mesi di Maggio, Giugno, Luglio e Settembre 2006.

Nel mese di Settembre, infine, g_L nuovamente aumentava in tutti e tre i siti come conseguenza delle abbondanti e frequenti precipitazioni meteoriche verificatesi nel mese di Agosto (Fig. 1b). Tuttavia il valore di questo parametro, che variava tra 84.5 mmol m^{-2} s^{-1} nel sito di Monte Valerio e 55 mmol m^{-2} s^{-1} nel sito della Cernizza, in tutti e tre i siti era solamente il 64% di quello massimo registrato ai primi di Giugno. Il valore di Ψ_{foglia} (potenziale minimo diurno) variava tra –1.7 MPa nel sito della dolina di Borgo Grotta Gigante e -2.8 MPa nel sito della Cernizza cioè era risalito solo parzialmente rispetto al mese di Luglio. In particolare, il recupero dello stato di idratazione interno delle piante era risultato maggiore nel sito di Monte Valerio in confronto agli altri due siti. L'aspetto più interessante dell'andamento di Ψ_{foglia} in Settembre è che $\Psi_{prealba}$ (= Ψ_{max}) era tornato ai valori primaverili, indicando un sostanziale recupero notturno dello stato dell'acqua nella pianta. I valori di $\Psi_{prealba}$ variavano, infatti, tra -0.4 MPa nel sito della Cernizza e -0.6 MPa nel sito della dolina di Borgo Grotta Gigante, rientrando così nei valori registrati tra Maggio e Giugno. In questo quadro ecofisiologico complessivo, bisogna tener presente che Settembre 2006, da un punto di vista meteorologico, è stato ritenuto un mese caratterizzato da temperature piuttosto elevate (Fig. 1b) per la media del periodo (Fig. 2) e le piogge, piuttosto scarse, si erano concentrate per lo più in pochi giorni (OSMER-FVG).

Per poter eseguire un confronto delle misure idrauliche nei tre siti rappresentativi su base annuale, a Luglio 2006 è stata misurata la conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) e in Fig. 6 sono riportati i valori del 2005 e del 2006 in confronto fra loro. Non si è rilevata differenza alcuna in K_{foglia} per i due anni quantunque nei venti giorni precedenti la misura di K_{foglia}, l'apporto di acqua meteorica nel 2006 fosse stato di circa 100 mm minore rispetto a quello verificatosi nel 2005.

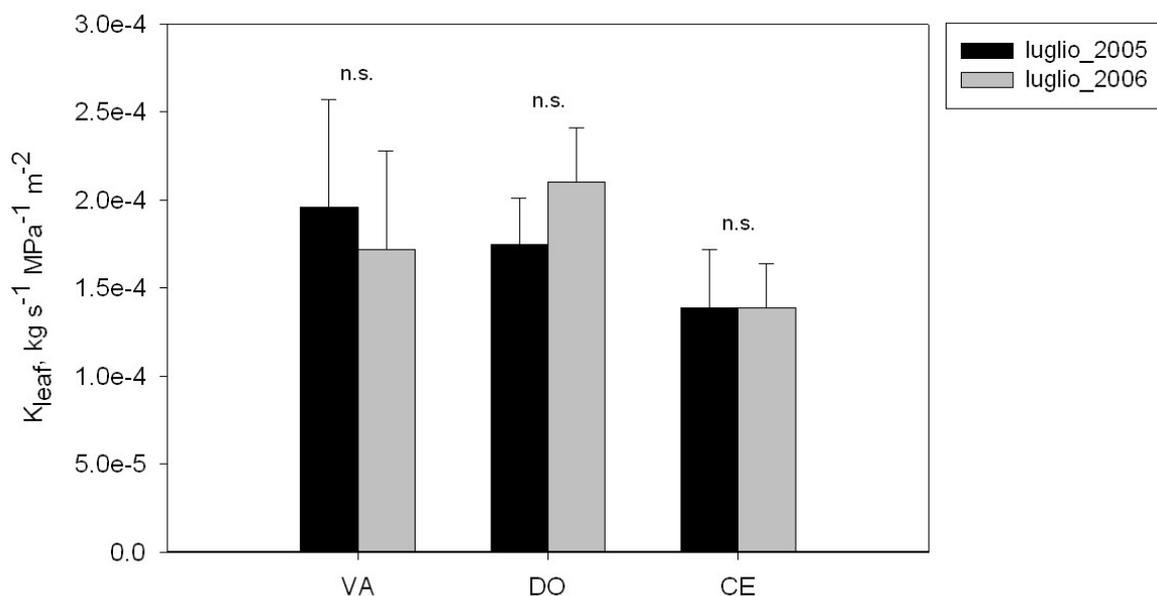



Fig. 6 – Andamento su base annuale della conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) nei tre siti rappresentativi.

Nel periodo da Maggio ad Agosto del 2007 sono state eseguite le isoterme del potenziale dell'acqua della foglia, ossia le curve pressione-volume. Si è proceduto quindi a misurare il potenziale osmotico a pieno turgore (π_0), il potenziale dell'acqua al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}) e il modulo elastico medio delle pareti cellulari (ε_{max}). Tali parametri sono riportati in Fig. 7. Nei tre siti studiati l'orniello, in coincidenza con un periodo di aridità, non ha evidenziato meccanismi di osmoregolazione (π_0 era costante in primavera e in estate). Anche il valore di Ψ_{TLP} misurato nel periodo estivo (Luglio-Agosto) non evidenziava alcuna differenza di rilievo fra siti o fra periodi dell'anno anche se esso tendeva ad essere lievemente più negativo nel sito della Cernizza (-2.6 MPa) in confronto al sito della dolina di Borgo Grotta Gigante (-2.3 MPa) e a quello di Monte Valerio (-2.4 Mpa). Per quanto riguarda ε_{max}, era invece interessante notare che tale parametro nei mesi di Luglio e Agosto diveniva minore nei siti di Monte Valerio e Cernizza, mentre rimaneva invariato nel sito della Dolina di Borgo Grotta Gigante. Poiché ε_{max} è rappresentativa del grado di elasticità delle pareti cellulari delle

cellule vive del mesofillo, tale riduzione suggerisce che in Luglio-Agosto fossero iniziati i primi fenomeni di senescenza fogliare. I risultati ottenuti dall'analisi delle curve pressione-volume nel periodo estivo non erano stati molto soddisfacenti da un punto di vista ecofisiologico. A Luglio e ad Agosto, infatti, le condizioni meteorologiche verificatesi sono state varie e contrastanti: periodi caldi e stabili si alternavano a periodi più freschi e piovosi (OSMER-FVG).

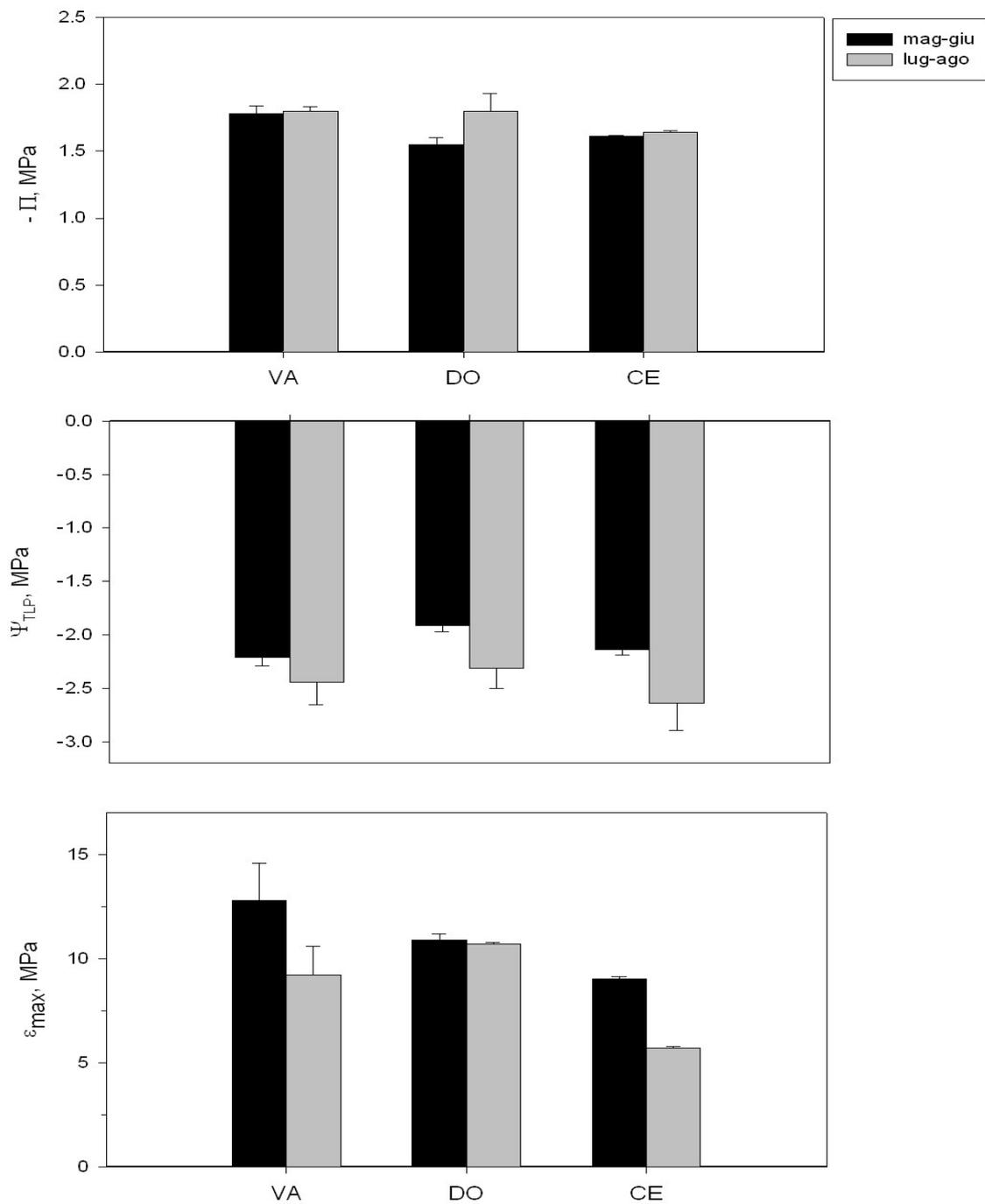



Fig. 7 – Potenziale osmotico a pieno turgore (-π_0), potenziale dell'acqua al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}) e modulo elastico medio delle pareti cellulari (ε_{max}) derivati dall'analisi delle curve pressione-volume relative ai mesi di Maggio-Giugno e Luglio-Agosto 2007 nei siti di Monte Valerio, Dolina di Borgo Grotta Gigante e Cernizza.

7.2.2 Misure su base diurna di g_L, Ψ_{foglia} e K_{foglia} nelle 21 stazioni di campionamento

A Luglio 2006 sono state eseguite le misure di g_L, Ψ_{foglia} e K_{foglia} nelle 21 stazioni di campionamento (Tabella 1).

Stazione	Sigla Stazione	Altitudine s.l.m. (m)	Grado di carsificabilità
Bovedo	BO	166	molto bassa
Monte Valerio	VA	152	
Laghetti Noghere	NO	17	
Ceroglie dell'Hermada	ER	165	
Monrupino	MN	336	
San Pelagio	SP	218	
Piccolo Lanaro	PL	395	
Sgonico	SG	309	bassa
Medeazza	ME	74	
Area di Ricerca	AR	374	
Vedetta Slataper	VS	251	alta
Grozzana	GZ	485	
San Lorenzo	SL	384	
Val Rosandra	RO	122	
Dolina di Borgo Grotta Gigante	DO	260	altissima
Casa Romana	CR	115	
Cernizza	CE	23	
Gropada	GR	419	
Samatorza	SA	256	
Banne	BA	324	
Percedol	PE	285	

Tabella 1

I valori medi di tali parametri sono riportati in Fig. 8. I valori di g_L mostravano livelli massimi di 58.3 mmol m^{-2} s^{-1} nel sito del Piccolo Lanaro e decrescevano sensibilmente fino a raggiungere il valore più basso di 8.1 mmol m^{-2} s^{-1} nel sito di Sgonico. Per quanto riguarda Ψ_{foglia}, i valori variavano tra -0.9 MPa nel sito di Laghetti Noghere e -3.5 MPa nei siti di Casa Romana, Cernizza e

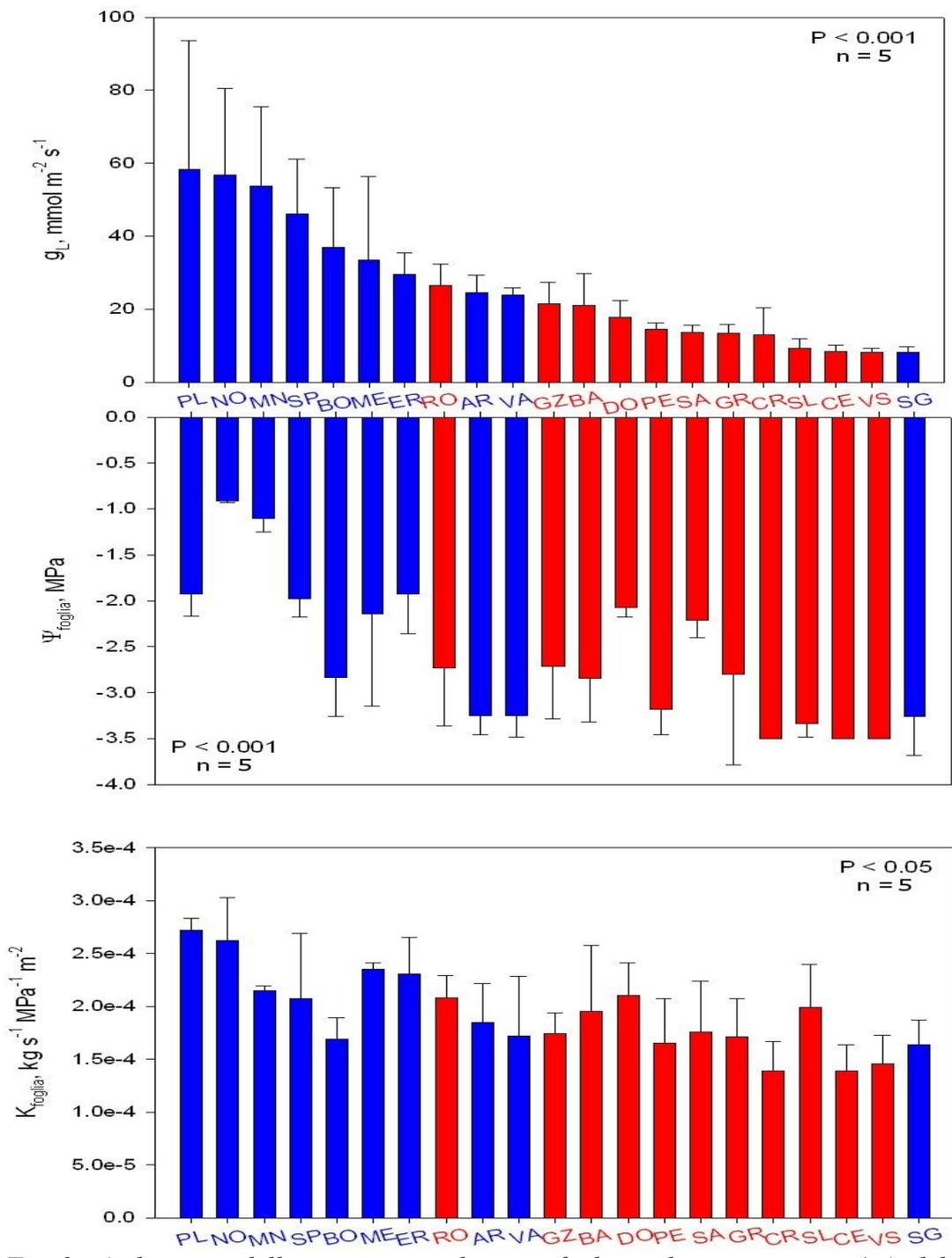



Fig. 8 - Andamento della massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), del potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e della conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) misurati nelle 21 stazioni di campionamento a Luglio 2006.

Bassa carsificabilità:	Alta carsificabilità:
PL - Piccolo Lanaro	RO - Val Rosandra
NO - Laghetti Noghere	GZ – Grozzana
MN - Monrupino	BA - Banne
SP - San Pelagio	DO - Dolina (Borgo Grotta Gigante)
BO - Bovedo	PE - Percedol
ME - Medeazza	SA - Samatorza
ER - Ceroglie dell’Hermada	GR - Gropada
AR - Area di Ricerca	CR - Casa Romana
VA - Monte Valerio	SL - San Lorenzo
SG – Sgonico	CE - Cernizza
	VS - Vedetta Slataper

Vedetta Slataper. Nel complesso, i valori di K_{foglia} erano molto più costanti e variavano fra 2.72 x 10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1} nel sito del Piccolo Lanaro e 1.50 x 10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1} nei siti di Casa Romana e Cernizza. Per ognuno di questi tre parametri fisiologici misurati, esisteva una differenza statisticamente significativa tra le medie dei valori nei 21 siti. In particolare, per g_L e Ψ_{foglia} il valore di significatività in base al Test di Student risultava essere più alto ($P<0.001$) in confronto a quello calcolato per K_{foglia} ($P<0.05$). Va inoltre notato che la conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) presentava valori consistentemente più bassi nei siti ad elevata carsificabilità (colonne rosse) che in quelli a basso drenaggio (colonne blu). Un po' meno evidente era la differenza fra le due condizioni di suoli nel caso dei valori di Ψ_{foglia} ove valori inferiori a -3 MPa erano riscontrabili anche nei siti AR e VA con carsificabilità assai bassa. Infine, la conduttanza idraulica della foglia mostrava differenze significative fra siti ma non in relazione con la carsificabilità. Tali relazioni appaiono più evidenti in Fig. 9 ove i parametri misurati sono riportati per i diversi siti raggruppati secondo il valore di carsificabilità. Qui, appare evidente come il parametro più sensibile alla elevata capacità di drenaggio dei suoli sia g_L mentre Ψ_{foglia} appare assai più variabile e K_{foglia} sia pressoché insensibile alla capacità di drenaggio dei suoli.

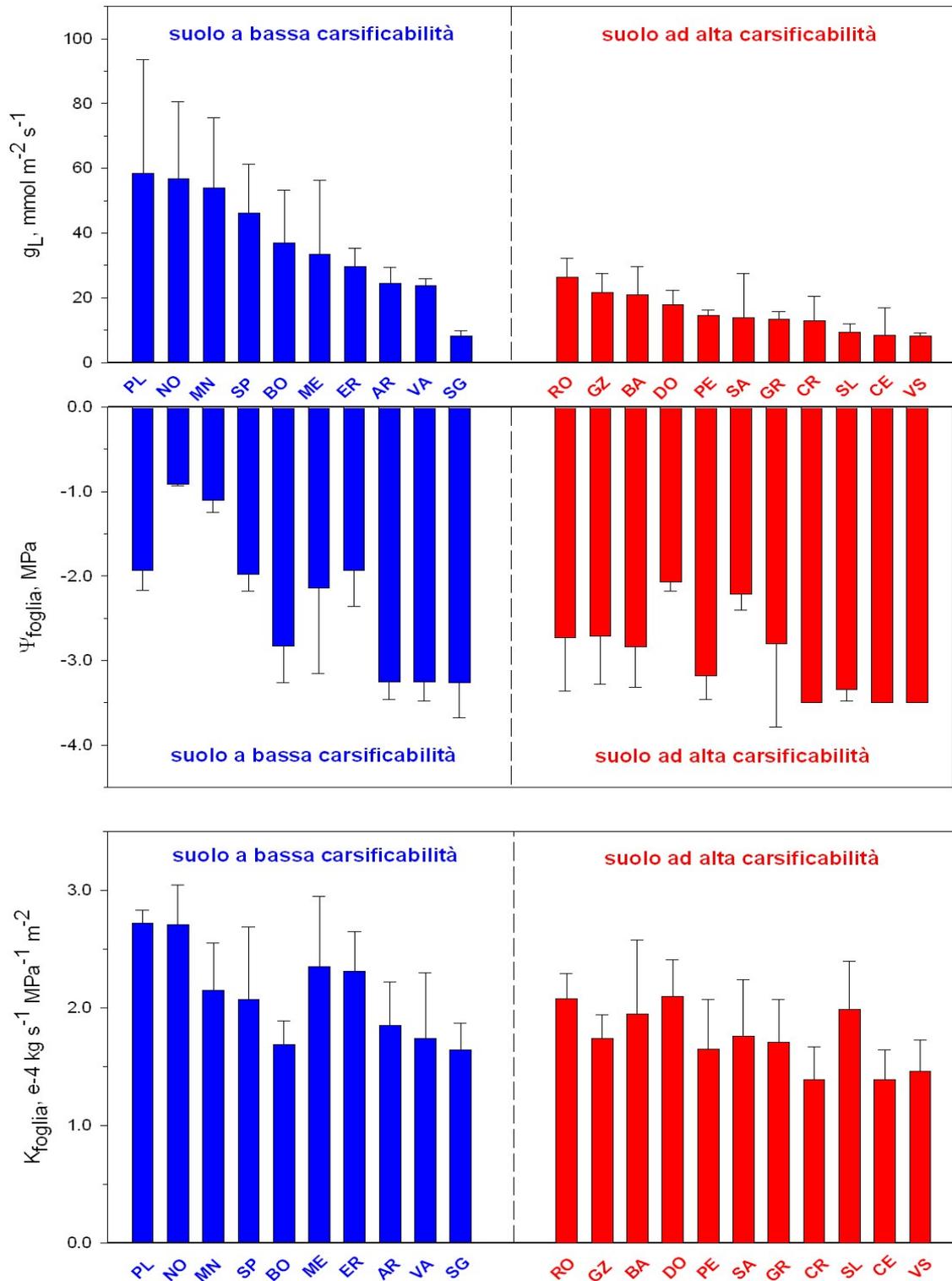



Fig. 9 – Andamento della massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), del potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e della conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) misurati nelle 21 stazioni di campionamento a Luglio 2006. Le aree di studio sono suddivise in base al criterio della carsificabilità.

In altri termini la carsificabilità era un criterio geomorfologico che distingueva molto bene i due gruppi di aree di studio (Fig. 9). I siti che presentavano un livello di carsificabilità molto bassa mostravano valori di g_L sufficientemente elevati, come nel caso del sito di Laghetti Noghere e del sito di Monrupino in cui g_L assumeva valori attorno a 55 mmol m^{-2} s^{-1}, con valori di Ψ_{foglia} che si mantenevano su valori poco negativi, attorno a -1.0 MPa. In questi siti K_{foglia} si manteneva su valori elevati, attorno a 2.30 x 10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1}. Quando il suolo si prosciugava rapidamente per effetto dell'altissima carsificabilità che lo caratterizzava, come avveniva nei siti della Cernizza, di Casa Romana e Vedetta Slataper, avveniva un drastico decremento di Ψ_{foglia} che raggiungeva il valore di circa -3.5 MPa e g_L assumeva valori di conduttanza cuticolare, attorno a 8 mmol m^{-2} s^{-1}. In tale situazione K_{foglia} risultava ridotta a valori di 1.39 x 10^{-4} kg s^{-1} m^{-2} MPa^{-1}. La Fig. 10 mostra in modo sinottico i tre parametri descrittivi delle relazioni pianta-acqua nelle reciproche interazioni. In particolare, appare evidente che il parametro più sensibile è la conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) mentre Ψ_{foglia} e K_{foglia} sono di più difficile interpretazione.

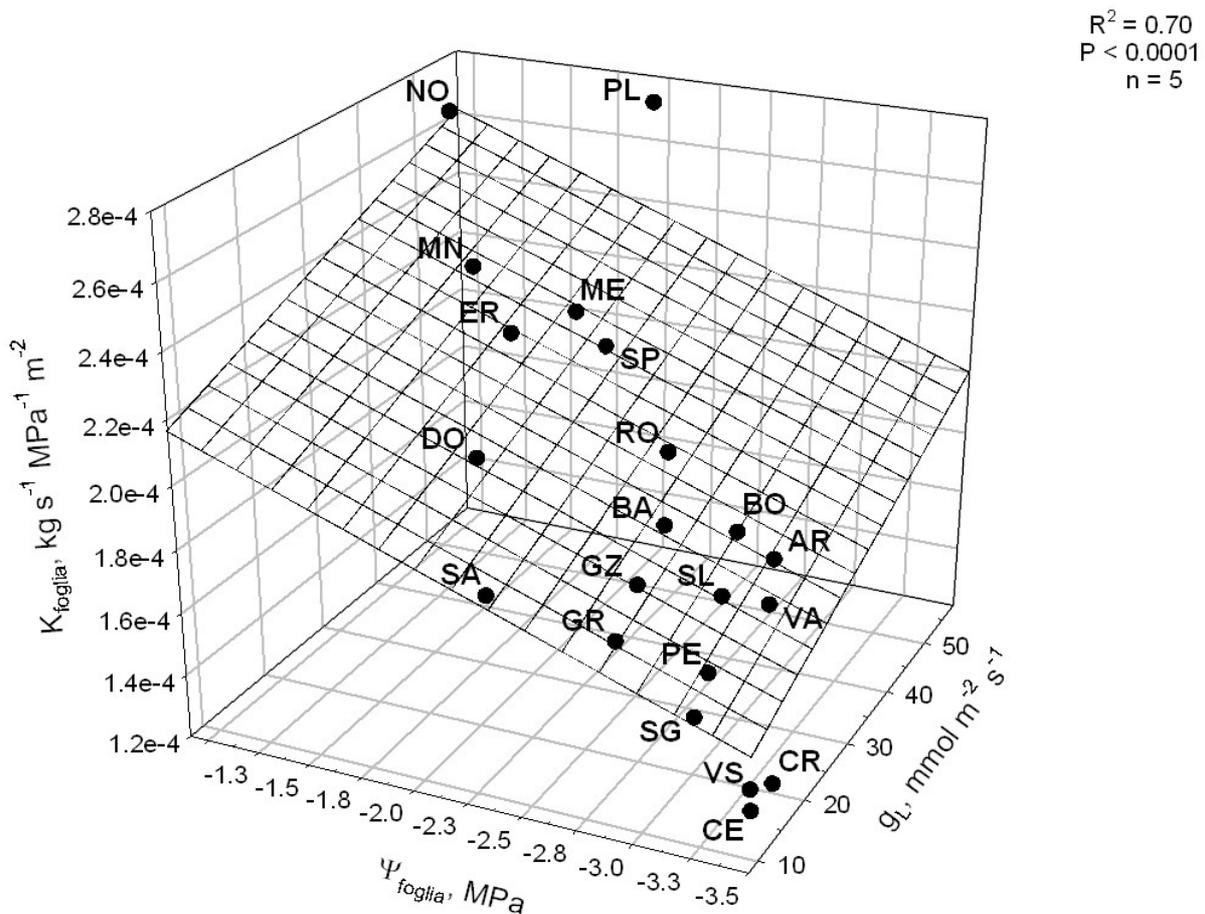



Fig. 10 – Massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) misurati nelle 21 stazioni di campionamento a Luglio 2006.

Le aree di studio, suddivise in due gruppi sulla base del criterio di carsificabilità del suolo, hanno mostrato di differire fra loro significativamente in termini di g_L, Ψ_{foglia} e K_{foglia} ma con diverso "peso". In altri termini, la differenza fra i due gruppi era altamente significativa nel caso di g_L ($P < 0.001$, Fig. 11). Era interessante notare che i siti caratterizzati da una bassa carsificabilità mostravano in media valori di g_L dell'ordine di 37 mmol m^{-2} s^{-1} contro valori medi di 15 mmol m^{-2} s^{-1} misurati nei siti caratterizzati da una alta carsificabilità. In questi ultimi siti i valori medi di Ψ_{foglia} risultavano essere più negativi di circa il 25% in confronto a quelli registrati nei siti a bassa carsificabilità. Analogamente, i valori di K_{foglia} nei siti caratterizzati da alta carsificabilità risultavano essere minori di circa il 20% rispetto ai valori medi registrati nei siti a bassa carsificabilità.

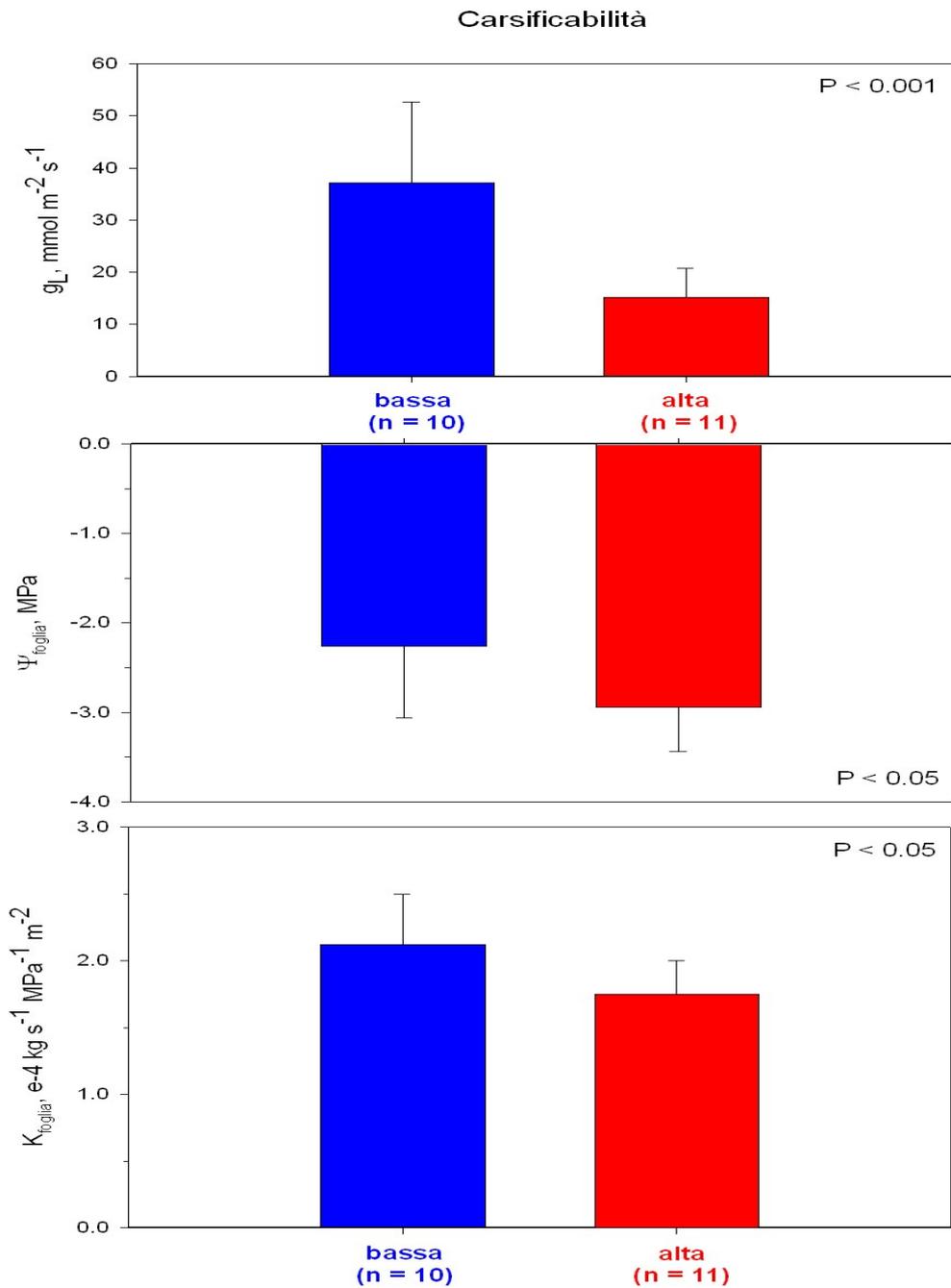



Fig. 11 – Massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L), del potenziale minimo dell'acqua della foglia (Ψ_{foglia}) e della conduttanza idraulica della foglia (K_{foglia}) misurati a Luglio 2006 nelle 21 stazioni di campionamento, raggruppate in base alla carsificabilità.

7.3 Misure morfoanatomiche

Le 21 aree di studio esaminate, suddivise nei due gruppi distinti sulla base del criterio della carsificabilità, hanno mostrato di differire fra loro significativamente in termini di struttura anatomica del sistema xilematico, in particolare in relazione al diametro dei vasi xilematici nei rami di due anni (Tabella 2). Il valore medio di questo parametro nei siti a bassa carsificabilità risultava essere dell'ordine di 22.8 μm, mentre nei siti ad alta carsificabilità era di circa il 15% minore (19 μm, Fig. 12).

	Stazione	**Sigla Stazione**	**Diametro condotti xilematici ± deviazione standard (μm)**
Bassa carsificabilità	Bovedo	BO	21.9 ± 1.4
	Monte Valerio	VA	26.6 ± 4.0
	Ceroglie dell'Hermada	ER	22.0 ± 1.8
	Monrupino	MN	20.8 ± 0.4
	San Pelagio	SP	22.0 ± 1.4
	Piccolo Lanaro	PL	22.7 ± 1.1
	Sgonico	SG	23.9 ± 1.5
	Medeazza	ME	20.9 ± 2.9
	Area di Ricerca	AR	23.9 ± 2.8
Alta carsificabilità	Vedetta Slataper	VS	16.0 ± 2.3
	Grozzana	GZ	21.2 ± 0.5
	San Lorenzo	SL	22.4 ± 1.4
	Val Rosandra	RO	19.8 ± 0.7
	Dolina di Borgo Grotta Gigante	DO	18.8 ± 1.3
	Casa Romana	CR	18.2 ± 2.3
	Cernizza	CE	16.9 ± 2.0
	Gropada	GR	22.1 ± 1.7
	Samatorza	SA	17.6 ± 1.6
	Banne	BA	18.0 ± 1.1
	Percedol	PE	18.4 ± 0.7

Tabella 2

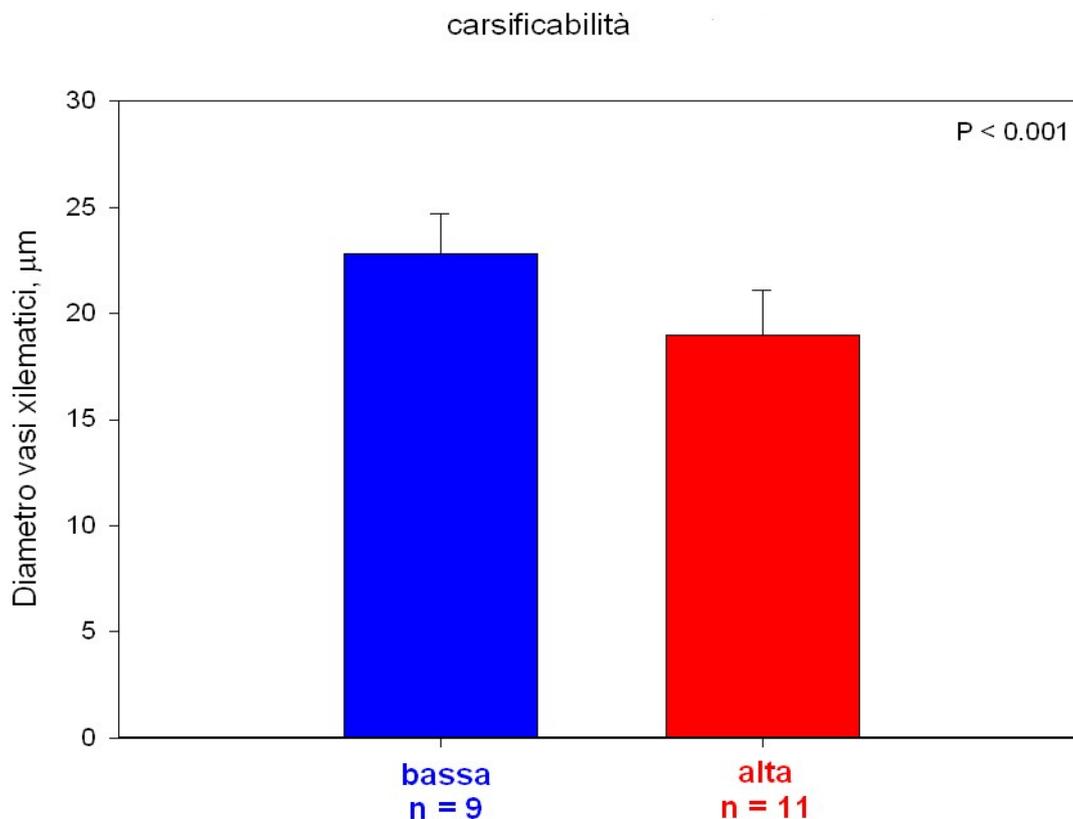



Fig. 12 – Diametro dei vasi xilematici relativi alla produzione vascolare dei fusti nel 2006 misurati nei due gruppi di aree di studio distinti in base alla carsificabilità.

Tale differenza era significativa per P<0.001 come confermato dal Test di Student. Si noti a tal riguardo che differenze apparentemente piccole in termini di diametro, si amplificano esponenzialmente (r^4) in termini di flusso, in accordo con l'equazione di Hagen-Poiseuille. I due gruppi di aree di studio hanno mostrato di differire significativamente anche in termini di conduttività teorica ($K_{teorica}$), infatti, come si può osservare in Fig. 13. Nei siti ad alta carsificabilità il valore di $K_{teorica}$ calcolata (3.43×10^{-8} m^4 MPa^{-1} s^{-1}) era circa la metà di quello calcolato per i siti a bassa carsificabilità (6.90×10^{-8} m^4 MPa^{-1} s^{-1}). In altri termini, l'efficienza idraulica ovvero la capacità di trasporto dell'acqua nei vasi xilematici dei rami studiati (di cui $K_{teorica}$ è espressione) era notevolmente maggiore nelle aree a bassa carsificabilità rispetto a quella nelle zone ad alta carsificabilità.

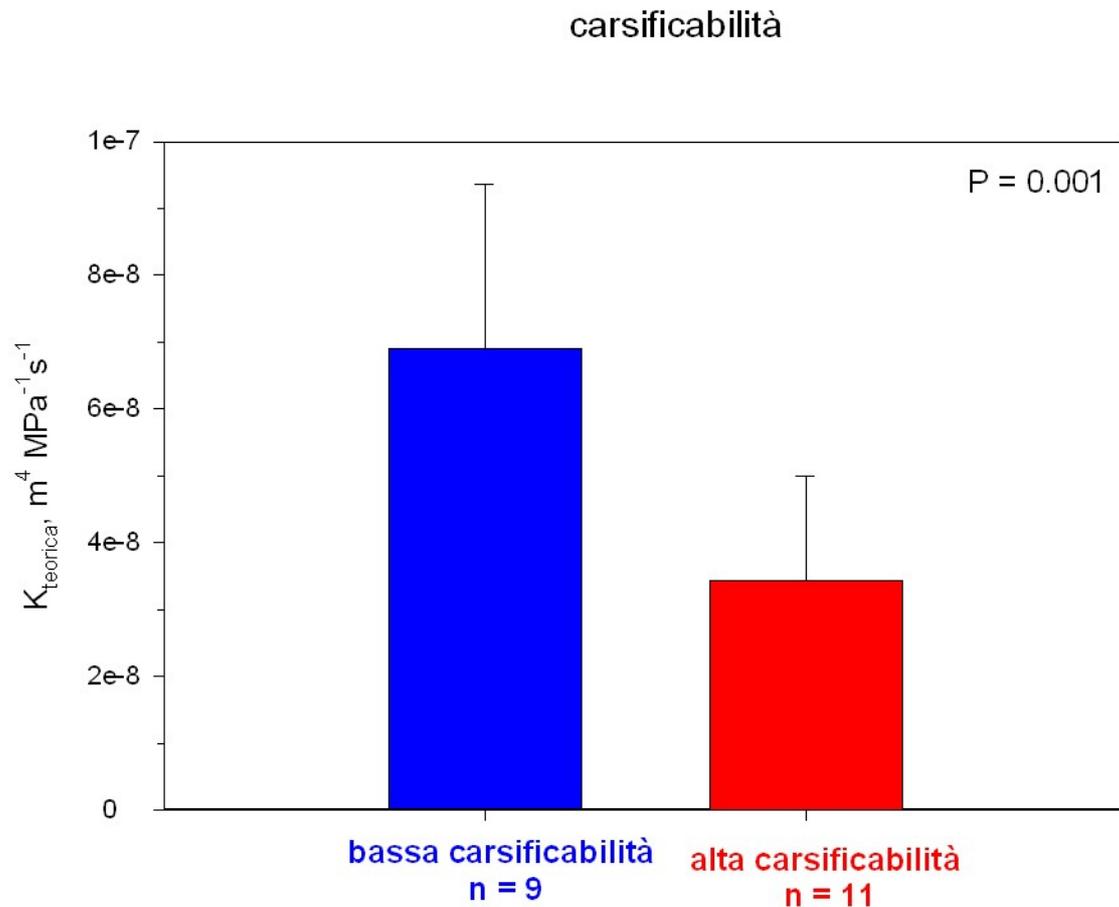



Fig. 13 – Conduttività teorica ($K_{teorica}$) calcolata per i due gruppi distinti secondo il criterio di carsificabilità.

Il diametro dei vasi xilematici in rami di due anni era ben correlato con la lunghezza degli stessi, misurata in alcuni siti caratterizzati da diverso livello di carsificabilità (Fig. 14). In particolare, il coefficiente di determinazione (r^2) fra i due parametri era pari a 0.96. Questo risultato non è sorprendente, in considerazione del fatto che è lecito aspettarsi una correlazione lineare positiva tra le due variabili. Ciò che era interessante notare è che nelle condizioni di accentuata aridità che hanno caratterizzato il Luglio 2006 (Fig. 1b), nei siti ad altissima carsificabilità (Casa Romana, Cernizza) sono stati prodotti vasi corti e stretti, mentre nei siti a molto bassa carsificabilità (San Pelagio, Monte Valerio) i vasi xilematici del fusto risultavano essere di maggiori dimensioni, ciò che suggerisce una forte “plasticità” delle dimensioni dei vasi xilematici su base stagionale.

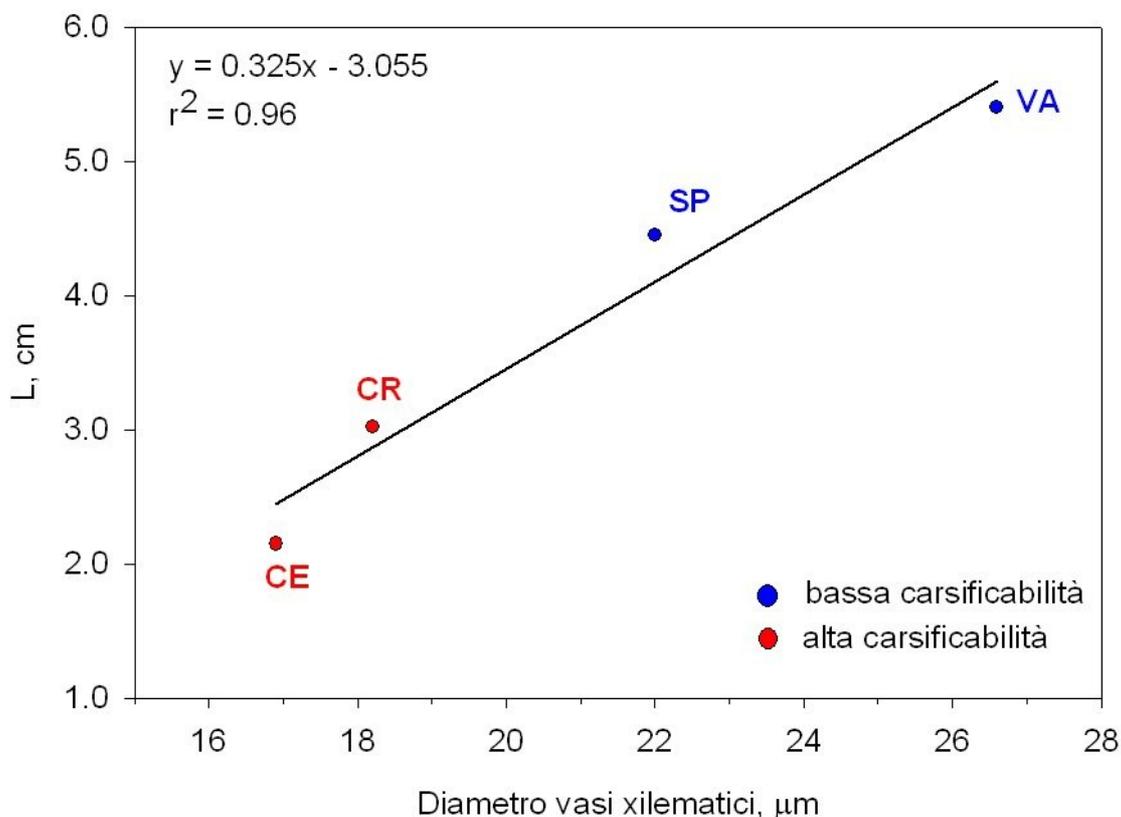



Fig 14 – Relazione tra il diametro e la lunghezza dei vasi xilematici. I due parametri sono relativi alla produzione vascolare del 2006 in rami prelevati da siti ad altissima carsificabilità (Cernizza, Casa Romana) e a molto bassa carsificabilità (San Pelagio, Monte Valerio). In particolare, L (cm) rappresenta la classe di lunghezza nella quale ricadono l'80% dei vasi xilematici nei rami di due anni.

I due gruppi di aree di studio, divisi in base alla carsificabilità, non erano invece significativamente differenti in termini di superficie fogliare specifica (SLA, Fig. 15a) e nemmeno in rapporto all'area fogliare media (A_{foglia}, Fig.15b). In ciascuno dei due gruppi, infatti, SLA variava tra circa 21 e 10 m^2 kg^{-1} e A_{foglia} era compresa tra circa 110 e 70 cm^2. Tuttavia, per questi due parametri era possibile apprezzare una differenza statisticamente significativa tra i 21 siti considerati nel loro complesso. I dati sottoposti al Test di Student dimostravano, infatti, come la differenza tra i diversi siti fosse significativa per $P<0.001$.

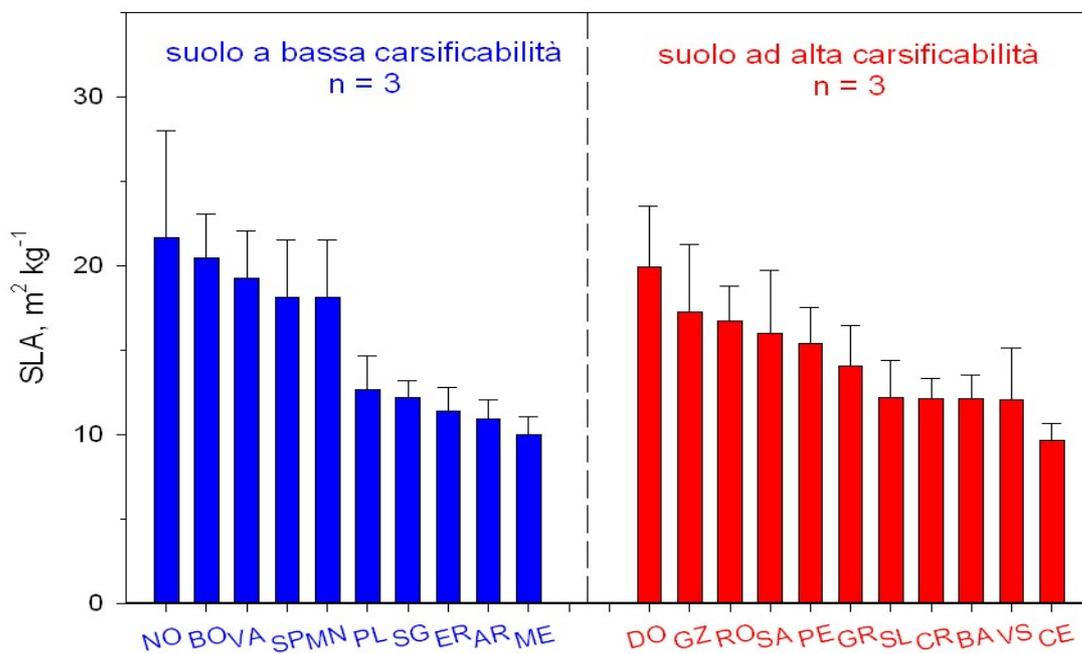



Fig. 15a – Superficie fogliare specifica (SLA) misurata a Luglio 2006 nelle 21 aree di studio.

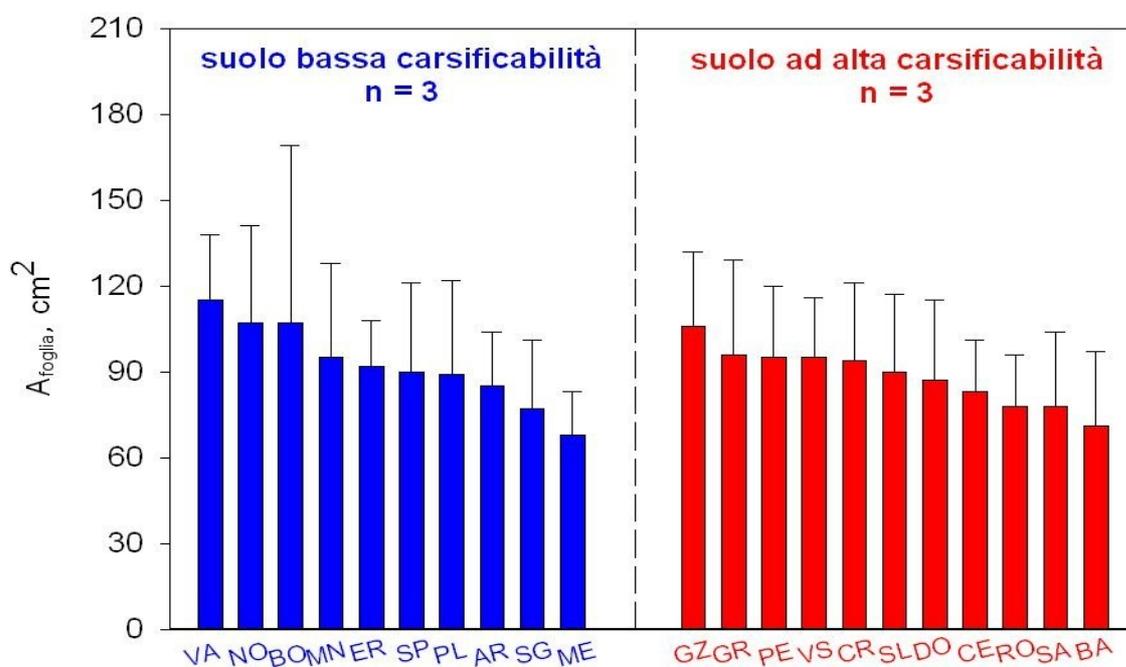



Fig. 15b – Area fogliare (A_{foglia}) misurata a Luglio 2006 nelle 21 aree di studio.

7.4 Metodologie aggiuntive applicate: Telerilevamento

Ponendo in relazione l'indice LSWI (Land Surface Water Index) calcolato come specificato in materiali e metodi e g_L misurata a Luglio 2006 nelle 21 stazioni di rilevamento, si otteneva una correlazione lineare positiva e significativa per il Test di Student ($P<0.05$), ma caratterizzata da un basso valore del coefficiente di determinazione ($r^2=0.23$, Fig.16a).

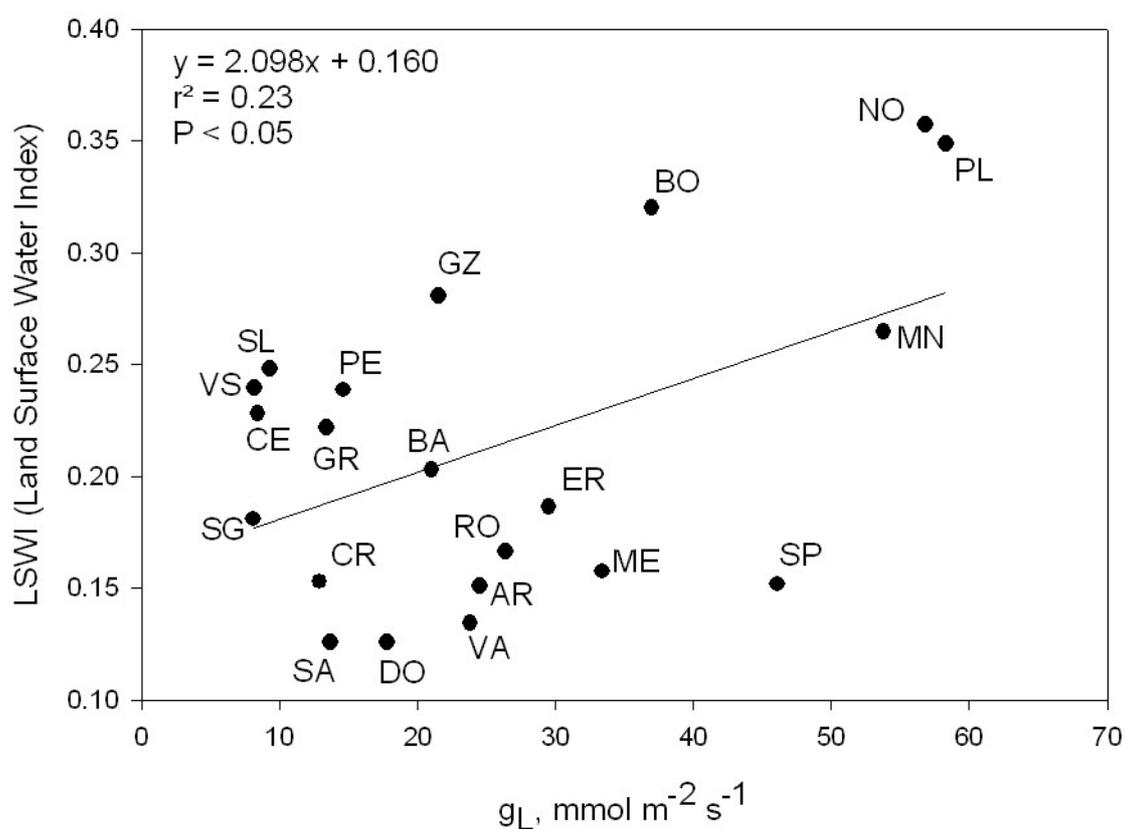



Fig 16a – Relazione tra l'indice LSWI (Land Surface Water Index) e la massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) misurata a Luglio 2006 nelle 21 stazioni di campionamento.

Se invece si consideravano le 21 aree di studio, suddivise nei due gruppi in base al criterio di carsificabilità, si otteneva una correlazione lineare positiva con un maggiore coefficiente di determinazione ($r^2=0.50$) solamente per il gruppo dei siti

la cui carsificabilità era bassa (cerchi blu, Fig.16b). Nei siti caratterizzati da una carsificabilità molto bassa, come ad esempio Laghetti Noghere, Piccolo Lanaro e Monrupino, l'indice LSWI era compreso tra 0.25 e 0.35 e g_L si manteneva su valori compresi tra 50 e 60 mmol m^{-2} s^{-1} indicando che le piante presentavano completa apertura stomatica. Non esisteva, invece, nessuna correlazione per quanto riguardava i siti caratterizzati da alta carsificabilità (cerchi rossi, Fig. 16b). Tale risultato era sorprendente. L'indice LSWI nel gruppo dei siti caratterizzati da alta carsificabilità non assumeva valori negativi ma compresi tra 0.10 e 0.30, senza evidenziare una qualsiasi tendenza quando g_L si riduceva drasticamente fino a raggiungere una conduttanza pressoché cuticolare.

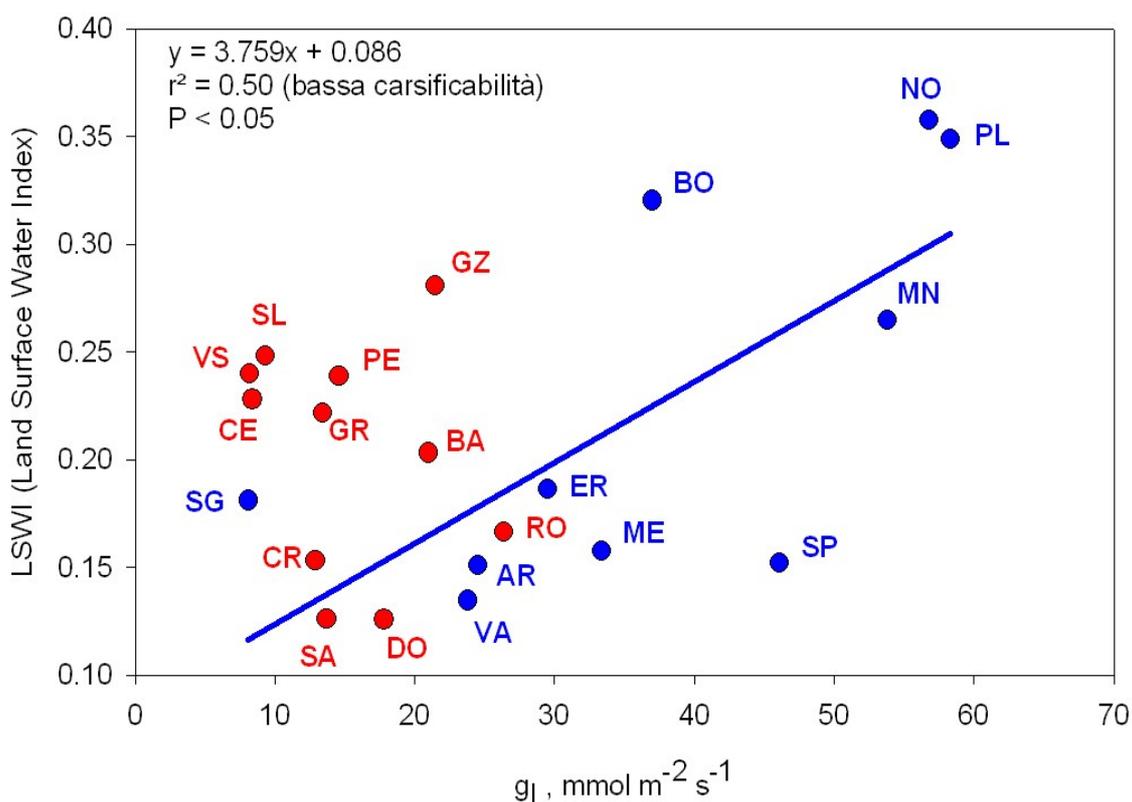



Fig 16b – Relazione tra l'indice LSWI (Land Surface Water Index) e la massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) misurata a Luglio 2006 nelle 21 stazioni di campionamento, suddivise in due gruppi in base alla carsificabilità. Nel grafico è riportata la retta di regressione relativa al gruppo di siti a bassa carsificabilità (cerchi blu) con il relativo coefficiente di determinazione r^2. Non esiste correlazione per il gruppo di siti ad alta carsificabilità (cerchi rossi).

8 Discussione

8.1 *Fraxinus ornus* quale biomonitor dell'aridità ambientale, sulla base delle sue caratteristiche idrauliche

La misura dei parametri relativi al bilancio idrico di *Fraxinus ornus* effettuate nel corso del presente studio hanno permesso di delineare la strategia adottata da questa specie in condizioni di variabile limitazione della disponibilità di acqua sia su base diurna che su base stagionale. Il complesso delle misure effettuate mostrava che nei periodi di maggiore aridità le foglie andavano incontro ad una marcata disidratazione. Infatti, il potenziale dell'acqua fogliare (Ψ_{foglia}) scendeva a valori fortemente negativi. Parallelamente, si osservava una accentuata chiusura stomatica (Fig. 3, Fig. 9) che verosimilmente deprimeva l'attività fotosintetica in misura importante (Jarvis & Davies 1998). Nei vari siti oggetto di indagine, l'orniello subiva quindi pienamente gli effetti dello stress idrico da aridità, adottando una strategia obbligata di resistenza basata sulla tolleranza (Levitt 1980). Le specie cosiddette tolleranti, in effetti, sopportano lo stress idrico, cioè non mettono in atto meccanismi particolari per conservare un adeguato livello di idratazione, ma sono comunque in grado di sopportare un basso livello di energia libera dell'acqua interna (Salleo 1995).

E' noto che il livello di apertura stomatica dipende in parte dallo stato di idratazione della foglia e quindi dal valore di $\Psi_{foglia.}$ A parità di potenziale dell'acqua del suolo, il mantenimento o meno di adeguati livelli di idratazione delle foglie, pur in condizioni di elevata traspirazione, è condizionato dalla resistenza idraulica della pianta (R_{pianta}) (Sack & Holbrook 2006). Ne consegue che R_{pianta} condiziona fortemente gli scambi gassosi a livello fogliare. Le foglie rappresentano mediamente circa il 30% di R_{pianta} (Sack et al. 2003; Sack & Holbrook 2006), anche se sono noti casi in cui tale organo può rappresentare sino all'80% della resistenza idraulica della pianta nel suo complesso (Nardini & Salleo 2000). La resistenza idraulica della foglia (R_{foglia}) è quindi un importante fattore limitante dell'efficienza idraulica della pianta nel suo complesso. La

correlazione tra i parametri g_L, Ψ_{foglia} e K_{foglia} riportata in Fig. 10, suggerisce in effetti che gli scambi gassosi dell'orniello siano coordinati sia con lo stato idrico della pianta che con le proprietà idrauliche delle foglie. Ciò deriva dal fatto che il valore di K_{foglia} è sua volta in parte determinato dalle condizioni ambientali prevalenti e in modo particolare dalla disponibilità di acqua, quale conseguenza di fattori strutturali (Nardini & Salleo 2005) determinati ontogeneticamente così come di fattori fisiologici legati all'impatto dell'embolia xilematica su K_{foglia}. E' noto infatti che quando la pressione intravasale raggiunge valori critici, microbolle gassose vengono introdotte nei vasi attraverso i pori delle punteggiature intervasali determinando fenomeni di cavitazione xilematica ed embolia gassosa, che possono provocare una diminuzione di K_{foglia} (Nardini et al. 2003b). Studi recenti dimostrano come la foglia sia in effetti un organo particolarmente vulnerabile alla cavitazione xilematica (Nardini et al. 2001; Choat et al. 2005). E' noto che la coordinazione tra scambi gassosi e K_{foglia} è mediata da Ψ_{foglia} (Sperry 2000; Meinzer 2002). L'intervallo tra il valore di Ψ_{foglia} corrispondente alla chiusura degli stomi e Ψ_{foglia} al quale lo xilema è irreversibilmente embolizzato, è chiamato "margine di sicurezza". Per le specie che posseggono un ampio margine di sicurezza, gli stomi si chiudono assai prima che K_{foglia} vada incontro a importanti diminuzioni, mentre nelle specie con uno stretto margine di sicurezza, come è lecito supporre sia *F. ornus*, g_L viene ridotta della metà solo quando K_{foglia} si riduce di circa 20%. In effetti, questo è quanto si può osservare in Fig. 11 confrontando i due gruppi di aree di studio. Va tuttavia notato che la metodologia impiegata in questo studio per la misura di K_{foglia}, non permetteva di quantificare riduzioni di questo parametro dovute ad embolia xilematica, sicchè la variabilità di K_{foglia} nei vari siti di indagine va piuttosto interpretata quale evidenza dell'impatto della disponibilità di acqua sulla architettura idraulica della pianta che, a sua volta, influenzava profondamente gli scambi gassosi.

Studi precedenti svolti nell'area del Carso triestino (Tretiach 1993; Nardini et al. 2003a) su *F. ornus*, mostravano come tale specie adotti una strategia di risposta allo stress idrico da aridità simile a quella sopra descritta. In particolare, Nardini et al. (2003a) avevano registrato nel mese di Settembre tra le 12:00 e le

14:00 valori di g_L che si aggiravano attorno a 40 mmol m^{-2} s^{-1} e valori di Ψ_{foglia} pari a -3.5 MPa, corrispondenti al punto di perdita di turgore (Ψ_{TLP}). Sebbene, secondo gli autori, un così basso stato energetico dell'acqua delle foglie fosse attribuibile ai primi fenomeni di senescenza fogliare, essendo l'orniello una specie decidua, essi ipotizzavano che la caduta di Ψ_{foglia} potesse anche essere conseguenza della forte limitazione nella disponibilità d'acqua registrata ad Agosto, mese in cui le precipitazioni erano state di appena 20 mm. I valori fisiologici monitorati in tale studio erano molto simili a quelli registrati nella presente ricerca, a seguito della marcata aridità verificatasi nel 2006, come già descritto nella sezione Risultati. Viene quindi qui confermato quanto riportato dagli studi precedenti. Inoltre, valori estremamente negativi di Ψ_{foglia} sono stati registrati anche in altri studi relativi a *F. ornus*. In uno studio recente (De Mei & Di Mauro 2006) finalizzato alla ricerca di specie adatte alla rinaturalizzazione di ex discariche nella regione Puglia ed effettuato su un certo numero di specie erbacee e arboree, l'orniello durante il periodo arido estivo (in particolare nel mese di Agosto del 2003) era risultata la specie vegetale che esibiva il più basso potenziale dell'acqua, con valori prossimi a -3.5 MPa. Milburn et al. (1980) in uno studio nell'area di Castelbuono (Palermo) avevano registrato, in condizioni di forte stress idrico, valori di potenziale di *F. ornus* pari a -4.5 MPa.

L'orniello è risultato essere un ottimo candidato da utilizzarsi quale specie biomonitor affidabile, in attività di biomonitoraggio dell'aridità ambientale. Dall'analisi delle relazioni pianta-acqua, tale specie ha infatti mostrato una grande capacità di resistenza a condizioni di intenso stress idrico. Non appena le condizioni ambientali lo consentivano, infatti, l'orniello era in grado di recuperare (anche se non completamente) il suo stato di idratazione originale (Fig. 5). L'orniello è inoltre adatto come bioindicatore in aree a rischio di aridità in quanto è una specie altamente ubiquitaria e quindi presenta la vantaggiosa caratteristica di possedere un'elevata ampiezza ecologica che gli consente di insediarsi in una grande varietà di ambienti, offrendo così l'opportunità di effettuare monitoraggi di buona qualità anche su aree relativamente ampie. Le considerazioni di cui sopra suggeriscono come la scelta della specie vegetale più idonea ad un monitoraggio

dell'aridità ambientale come quello oggetto del presente studio, dovrebbe basarsi su una analisi preliminare del suo comportamento in condizioni di stress idrico. Si incorrerebbe in valutazioni erronee se si scegliesse una specie che mediante bassi flussi traspiratori riducesse la perdita d'acqua e prevenisse variazioni critiche di potenziale dell'acqua fogliare (Ψ_{foglia}), come ad esempio *Quercus coccifera* L. che è stata utilizzata in passato per studi analoghi in area mediterranea (Vertovec et al. 2001). In questa specie, una parziale chiusura stomatica è infatti già sufficiente a ridurre consistentemente la perdita d'acqua e a mantenere un buon livello di idratazione con valori di RWC (che esprime la distanza fra il contenuto idrico attuale delle foglie e quello ottimale di massimo turgore) relativamente alti. L'utilizzo di una specie con simile comportamento non renderebbe infatti possibile individuare un gradiente di aridità ambientale e distinguere aree diversamente interessate da tale fenomeno.

La capacità di una specie di mantenere un'elevata conduttanza idraulica radicale potrebbe rappresentare, come suggerito da alcuni autori (Nardini et al. 1999; Nardini & Pitt 1999), uno dei principali fattori che contribuiscono a determinare la strategia di resistenza allo stress da aridità adottata dalle varie specie vegetali. Le radici, assieme alle foglie, sono gli organi in cui è localizzata una frazione consistente della resistenza idraulica della pianta (Nardini & Tyree 1999; Tsuda & Tyree 2000) e sono molto sensibili alle variazioni nella disponibilità d'acqua nel suolo (Lo Gullo et al. 1998; Steudle 2000). Esperimenti condotti nell'ambito di progetti di riforestazione in Grecia su giovani semenzali di *F. ornus* hanno rivelato una certa sensibilità delle radici di questa specie a condizioni di aridità (Radoglou & Raftoyannis 2000, 2001). Nello studio condotto da Nardini e collaboratori (2003a) è stata calcolata la resistenza idraulica della radice (R_{radice}) in piante di *F. ornus* utilizzando il metodo del flusso evaporativo (EF - “evaporative flux” method) basato sull'analogo idraulico della legge di Ohm, per cui $R_{radice}=(\Psi_{prealba} - \Psi_x)/E_L$ dove Ψ_x rappresenta il potenziale dell'acqua dello xilema misurato alla base del tronco. Quest'ultimo parametro veniva stimato avvolgendo con pellicola di plastica e alluminio la sera prima delle misure in campo alcune foglie che crescevano alla base della pianta. In queste condizioni, Ψ_{foglia} va ad

equilibrarsi con quello dello xilema adiacente. Per ottenere Ψ_x quindi veniva misurato Ψ_{foglia} il giorno successivo alle 12:00. R_{radice} risultava aumentare notevolmente in seguito ad un periodo di aridità rispetto a quella registrata nelle altre due specie studiate (*Cotinus coggygria* Scop. e *Prunus mahaleb* L.). Ciò confermerebbe una certa vulnerabilità del sistema radicale di *F. ornus* all'aridità del suolo e spiegherebbe come mai l'orniello, nel presente studio e soprattutto nei siti ad alta carsificabilità, subiva una sensibile riduzione della propria capacità di condurre acqua alle foglie, probabilmente a causa di un'estesa embolizzazione xilematica nelle radici o del blocco delle aquaporine lungo il percorso extravascolare dell'acqua in quest'organo. Tuttavia è possibile supporre che il sistema radicale di *F. ornus* in tutti i siti studiati mantenesse una buona capacità di recupero dallo stress idrico, visto il valore di $\Psi_{prealba}$ che nei tre siti rappresentativi, a Settembre dopo le intense piogge estive, era ritornato a valori ottimali (Fig. 5). Nell'ambito del territorio carsico uno studio approfondito relativo all'apparato radicale delle specie vegetali è particolarmente difficoltoso a causa della struttura rocciosa che caratterizza il substrato. Sarebbe certamente auspicabile disporre in futuro di informazioni relative alla profondità delle radici in queste zone, che rappresenta un tratto importante nel conferire tolleranza all'aridità (Bréda et al. 2006).

La resistenza alla cavitazione xilematica è uno dei più importanti caratteri funzionali che determinano il grado di resistenza di una specie vegetale allo stress idrico da aridità (Cruiziat et al. 2002). I fenomeni di cavitazione dell'acqua nello xilema, determinati da situazioni di stress idrico, sono più frequenti nei vasi a grande diametro rispetto a quelli a piccolo diametro; questi ultimi rappresentano pertanto un sistema di conduzione idraulico meno efficiente ma molto "sicuro" (Tyree & Sperry 1989). L'orniello è caratterizzato da un legno a porosità anulare (Speranza & Calzoni 1996), con sviluppo di vasi a grande diametro nel tardo periodo primaverile, che offrono una bassa resistenza idraulica e permettono un rapido trasporto della linfa. I vasi prodotti più tardivamente sono invece di diametro ridotto. L'anatomia del legno dell'orniello permette dunque una elevata efficienza nei periodi di maggiore disponibilità idrica e una elevata

sicurezza durante i periodi di aridità. Nelle condizioni di marcata aridità ambientale che hanno caratterizzato l'estate del 2006, i vasi xilematici prodotti nei fusti di piante che crescevano in siti a bassa carsificabilità mostravano diametri mediamente maggiori rispetto a quelli di fusti raccolti nelle piante localizzate in siti ad alta carsificabilità (Fig. 12). Quando il turgore cellulare è basso viene bloccato l'accrescimento per distensione e quindi vengono prodotti vasi corti e stretti. Il diametro dei vasi è, infatti, risultato essere direttamente proporzionale alla loro lunghezza (Fig. 14). Tale risultato conferma quanto riportato in letteratura (Tyree & Zimmermann 2002). Sebbene gli ornielli che crescono nei siti ad alta carsificabilità risultino indiscutibilmente svantaggiati in termini di capacità di trasporto dell'acqua (Fig.13), essi tuttavia traggono vantaggio dalle piccole dimensioni dei loro vasi, che giustificano quindi la notevole resistenza alla cavitazione.

In letteratura è stato riportato che il fattore-chiave che in realtà determina la vulnerabilità di una specie alla cavitazione è la dimensione dei pori delle membrane delle punteggiature (Zimmermann 1983; Tyree & Sperry 1989; Sperry & Tyree 1990; Cruiziat et al. 2002). Alcuni studi hanno misurato le dimensioni e lo spessore delle membrane delle punteggiature di *Fraxinus americana* L. (Choat et al. 2006) e di *Fraxinus mandshurica* Rupr. (Sano 2004) e hanno osservato che le punteggiature intervasali di queste specie erano caratterizzate da pori di piccole dimensioni e da spesse membrane. Pur non avendo effettuato misure dirette relative alle punteggiature di *F. ornus* e tenendo in considerazione con le dovute cautele i risultati ottenuti da tali studi per questo parametro, è ragionevole ipotizzare che nei siti ad altissima carsificabilità la produzione di vasi corti e stretti nel fusto abbia permesso all'orniello di raggiungere il necessario compromesso tra efficienza e sicurezza per la salvaguardia dell'integrità funzionale del sistema xilematico, a prezzo tuttavia di forti cadute di Ψ_{foglia}.

La sclerofillia, ossia la consistenza coriacea della foglia, è stata ritenuta per un certo periodo un adattamento evolutivo finalizzato al risparmio d'acqua (Poole & Miller 1975). Tuttavia negli ultimi anni questa ipotesi è stata soggetta a svariate critiche (Salleo et al. 1997). Uno studio eseguito da Lo Gullo e Salleo (1988) su

tre specie mediterranee (*Ceratonia siliqua*, *Laurus nobilis* e *Olea oleaster*) metteva in evidenza che tali specie vegetali presentavano valori simili di SLA (Specific Leaf Area), che esprime il grado di sclerofillia, ma non vi era correlazione alcuna con i parametri fisiologici generalmente usati per la stima dello stress idrico (g_L, Ψ_{foglia}, RWC). La sclerofillia non rappresentava quindi una specifica strategia di resistenza allo stress idrico. Analogamente, un altro studio (Salleo & Lo Gullo 1990) effettuato su diverse specie appartenenti al genere *Quercus* (*Quercus Ilex*, *Quercus suber* e *Quercus pubescens*) osservava valori differenti per SLA mentre g_L, Ψ_{foglia} e RWC avevano all'incirca lo stesso andamento su base diurna. Al momento, una delle ipotesi più convincenti afferma che la sclerofillia è strettamente legata alla carenza di nutrienti nel suolo, in particolare di azoto e di fosforo (Salleo & Nardini 2000). In questa ricerca, SLA (Fig. 15a) assieme all'area fogliare (A_{foglia}, Fig. 15b) non hanno mostrato di essere parametri morfologici sensibili alle variazioni di disponibilità d'acqua.

L'insieme dei dati sopra riportati suggerisce come tra i numerosi parametri fisiologici e morfologici analizzati in questa ricerca, la massima conduttanza fogliare al vapore acqueo (g_L) si sia dimostrata il parametro mediante il quale si può stimare in modo rapido e affidabile l'impatto dello stress idrico. Tale parametro è risultato, infatti, essere il più sensibile alle variazioni nella disponibilità d'acqua ed è quindi adatto a fungere da utile indice di aridità ambientale.

Questo indice potrebbe avere una notevole potenzialità applicativa nell'ambito delle attività di biomonitoraggio ambientale in quanto esso permette di individuare un gradiente dei livelli di aridità dell'ambiente nell'ambito di uno stesso territorio. Tale gradiente è individuabile con maggiore affidabilità se si conosce con precisione la struttura geomorfologica del territorio oggetto di studio. La carsificabilità è stato un parametro pedologico di fondamentale importanza nella valutazione della vulnerabilità di diverse aree del Carso triestino all'aridità. È noto, infatti, come le caratteristiche fisiche del suolo influenzino il contenuto idrico e la velocità di movimento dell'acqua nel suolo stesso e di conseguenza la quantità d'acqua che le piante possono assumere (Fernandez-Illescas et al. 2001).

Il vantaggio di applicare un indice di questo tipo risiede nel fatto che si possono eseguire misure veloci (circa una ogni 30 secondi) e ripetibili su un numero elevato di stazioni mediante il porometro, che è uno strumento poco costoso, semplice da usare e facile da trasportare in campo e soprattutto fornisce dati di buona ripetibilità. Inoltre, mediante la determinazione di g_L è possibile estrarre un maggior numero di informazioni riguardo ai possibili effetti delle variazioni nel contenuto idrico del suolo sulla fisiologia della pianta. Esiste infatti una elevata correlazione tra questo parametro e gli altri più comuni parametri di riferimento nella stima dello stress idrico (Ψ_{foglia}, K_{foglia}) come pure tra g_L e fotosintesi. Il principale limite nell'utilizzo di questo parametro consiste nella variabilità interspecifica che g_L può presentare. Non tutte le specie vegetali adottano la strategia della chiusura degli stomi come risposta allo stress idrico da aridità. Ad esempio *Cotinus coggyria* Scop., lo scotano, che è una specie vegetale piuttosto diffusa nel Carso triestino, mantiene un'elevata g_L testimoniando di un efficiente bilancio idrico della pianta anche in condizioni di aridità. In un programma di biomonitoraggio, la scelta del bioindicatore più adatto deve essere dunque effettuata attraverso misure preliminari di g_L in situ, in modo tale da non commettere errori nell'interpretazione dei dati biologici.

8.2 Integrazione di dati ecofisiologici e telerilevati

L'utilizzo delle tecniche di telerilevamento da satellite è risultato poco efficace per ciò che concerne l'obiettivo di questo studio ecofisiologico. L'indice LSWI (Land Surface Water Index) non è risultato sensibile nella stima dello stress idrico in aree caratterizzate da alta carsificabilità (Fig. 16b). L'infrarosso a lunghezza d'onda breve (SWIR) è la banda spettrale che nell'indice LSWI è sensibile al contenuto d'acqua della vegetazione e all'umidità del suolo. In tale banda spettrale l'assorbimento dipende dalla quantità d'acqua all'interno delle foglie e dalla quantità d'acqua presente nei primi centimetri di suolo. L'effetto altamente drenante che caratterizza le aree ad alta carsificabilità comporta un livello di acqua nel substrato superficiale del suolo molto basso. Dato che ad una bassa umidità del suolo corrisponde nella banda SWIR un basso assorbimento

ed un alta riflettanza, se il contenuto d'acqua nel suolo scende al di sotto di una certa soglia l'aumento della riflettanza è tale da provocare un fenomeno di saturazione nel sensore MODIS. Ne consegue che valori di umidità al di sotto di questa soglia non sono distinguibili dal livello di umidità relativo alla soglia (Altobelli, comunicazione personale).

Nell'utilizzo di indici di vegetazione, problemi legati alla saturazione sono comuni. Ad esempio è noto che l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) non è applicabile in studi sulla stima della biomassa verde nelle regioni delle foreste tropicali. Tale indice rende possibile la quantificazione della fitomassa in quanto presenta una forte correlazione con l'indice di area fogliare (LAI – Leaf Area Index), definito come la superficie fogliare totale incidente su un'unità di area. Tuttavia esso si satura a livelli di LAI di 3-4, mentre il valore medio di LAI nelle foreste tropicali si aggira attorno a 4.7 (Gao 1996; Asner et al. 2004; Anderson et al. 2007).

L'impiego del telerilevamento necessita perciò di essere sempre convalidato dai dati fisiologici ottenuti dalle rilevazioni in campo, come affermano Deshayes et al. (2006), nell'obiettivo di ottenere un'attendibile monitoraggio dello stress idrico nella vegetazione e più in generale dell'aridità ambientale. Per i problemi tecnologici connessi all'applicazione del telerilevamento da satellite, in questa ricerca non è stato possibile individuare un parametro di riferimento basato su dati telerilevati per la realizzazione di uno “scaling-up” ecologico. I risultati ottenuti in questa ricerca mettono quindi in evidenza i limiti nell'impiego delle metodologie di “remote sensing” che non possono essere applicate nel monitoraggio di situazioni ad elevata aridità ambientale quali la desertificazione.

8.3 Considerazioni finali

L'acquisizione di dati su 21 stazioni, sebbene siano state scelte in modo tale da coprire in modo omogeneo tutta la provincia di Trieste, è senza dubbio insufficiente a descrivere in modo approfondito ed esauriente il fenomeno dell'aridità ambientale su un'area dell'estensione di 211.2 km^2 come quella del Carso. Ad ogni modo, con il presente lavoro si sono delineati i connotati di un

approccio ecofisiologico alternativo finalizzato a quantificare l'aridità ambientale. I risultati derivanti da tale progetto di ricerca forniscono spunti interessanti dai quali sviluppare ulteriori ricerche nel campo della ecofisiologia su scala regionale. Nuovi studi potrebbero essere ad esempio finalizzati a estendere la ricerca ecofisiologica aumentando la densità dei siti di rilevamento ed il loro numero, per confermare l'applicabilità di un indice ecofisiologico su territori estesi. In quest'ottica potrebbero essere quindi localizzate aree permanenti di osservazione come riferimento costante nella valutazione dell'aridità. Ciò permetterebbe la raccolta di dati su base diurna, stagionale ed annuale contribuendo così alla realizzazione di un data-base di informazioni su lungo termine.

9 Bibliografia

- Altobelli A., Napolitano R., Bressan E., Mignozzi K., Hubina T., Feoli E. (2007) Prodotti MODIS per lo studio della vegetazione: teoria, applicazione pratica e problemi di scala. Atti dell'VIII Meeting degli utenti italiani di GRASS, Palermo, 14-16 febbraio 2007, http://gislab.dirap.unipa.it/grass_meeting/articoli
- Améglio T., Archer P., Cohen M., Valancogne C., Daudet F.A., Dayau S., Cruziat P. (1999) Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. Plant Soil 207, 155-167.
- Anderson L. O., Malhi Y., Shimabukuro Y.E., Aragão L.E.O.C. (2007) Evaluating MODIS vegetation and water indices for detecting canopy stress during the 2005 drought in Amazonia. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, 6593-6595.
- ANPA (2001a) Le piante come indicatori ambientali – Manuale tecnico-scientifico. RTI CTN_CON 1/2001. ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Roma.
- ANPA (2001b) I.B.L. Indice di Biodiversità Lichenica – Manuale ANPA. Manuali e Linee Guida 2/2001. ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Roma.
- APAT (2003a) Gestione delle aree di collegamento ecologico funzionale. Indirizzi e modalità operative per l'adeguamento degli strumenti di pianificazione del territorio in funzione della costruzione di reti ecologiche a scala locale. Manuali e linee guida 26/2003. APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e del Territorio, Roma.
- APAT (2003b) Le relazioni tra cambiamenti del clima ed ecosistemi vegetali. Rapporti 32/2003. APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e del Territorio, Roma.

- APAT (2006) I quaderni della Formazione Ambientale – Demografia ed Economia. APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, Roma.
- Archaux F. & Wolters V. (2006) Impact of summer drought on forest biodiversity: what do we know? Annals of Forest Science 63, 645-652.
- Asner G.P., Nepstad D., Cardinot G., Ray D. (2004) Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 16, 6039-6044.
- Ayres M. & Lombardero M. (2000) Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. Science of The Total Environment 262, 263-286.
- Bassow S.L., McConnaughay K.D.M., Bazzaz F.A. (1994) The response of temperate tree seedlings grown in elevated CO_2 to extreme temperature events. Ecological Applications 4, 560-593.
- Becker M. & Lévy G. (1982) Le dépéressiment du chêne en forêt de Tronçais: les causes écologiques. Annales des Sciences Forestieres 39, 439-444.
- Benyon R.G. (1999) Nighttime water use in an irrigated *Eucalyptus grandis* plantation. Tree Physiology 19, 853-859.
- Blasi C., Nimis P., Paolella A., Pignatti S. (1995) Ecosistema urbano ed tecnologico (in Pignatti S. ed. – Ecologia Vegetale). UTET, Torino, 435-467.
- Borghetti M., Cinnirella S., Magnani F., Saracino A. (1998) Impact of long-term drought on xylem embolism and growth in *Pinuns halepensis* Mill. Trees-Structure and Function 12, 187-195.
- Boyer J.S. (1995) Measuring water status of plants and soils. Academic Press, San Diego.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006) Temperate forest trees and stands undere severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science 63, 625-644.

- Brugnoli & Farquhar (2000) Photosynthetic fractionation of carbon isotopes, in photosynthesis: Physiology and Metabolism , R.C. Leegood, T.D. Sharkey, S. von Caemmerer (eds.). Kluwer Acccademic Publ., 399-434.
- Catorci A., Cesaretti S., Gatti R., Vitanzi A. (2006) Applicazione dei Valori di Bioindicazione allo studio sinecologico delle praterie alto-montane e subalpine della Valle dell'Ambro (Parco Nazionale dei Monti Sibillini - Italia centrale). XVI Congresso della Società Italiana di Ecologia, Viterbo/Civitavecchia 2006, http://www.ecologia.it/congressi/XVI/articles/
- Cheung Y.N.S., Tyree M.T., Dainty J. (1975) Water relations parameters on single leaves obtained in a pressure bomb and some ecological interpretations. Canadian Journal of Botany 53, 1342-1346.
- Choat B., Lahar E.C., Melcher P.J., Zwieniecki M.A., Holbrook N.M. (2005) The spatial pattern of air seeding thresholds in mature sugar maple trees. Plant, Cell and Environment 28, 1082-1089.
- Choat B., Brodie T.W., Cobb A.R., Zwieniecki M.A., Holbrook N.M. (2006) Direct measurements of intervessel pit membrane hydraulic resistance in two angiosperm tree species. American Journal of Botany 93, 993-1000.
- Cochard H., Ridolfi M., Dreyer E. (1996) Responses to water stress in an ABA-unresponsive hybrid poplar (*Populus koreana* x *trichocarpa* cv 'Peace') II: Hydraulic properties and xylem embolism. The New Phytologist 134, 455-461.
- Cochard H., Lemoine D., Améglio T., Grainer A. (2001) Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. Tree Physiology 21, 27-33.
- Cochard H. (2002) Xylem embolism and drought-induced stomatal closure in maize. Planta 215, 466-471.
- Cruiziat P., Cochard H., Ameglio T. (2002) Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. Annals of Forest Science 59, 723-752.

- Cucchi F., Pirini Radrizzani C., Pugliese N. (1987) The carbonate stratigraphic sequence of the Karst of Trieste (Italy). Memorie della Società Geologica Italiana 40, 35-44.
- Cucchi F., Pugliese N., Ulcigrai F. (1989) Il Carso triestino: note geologiche e stratigrafiche. International Journal of Speleology 18, 49-64.
- Davies W.J. & Zhang J. (1991) Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Annual Review of Plant Physiology. Plant Molecular Biology 42, 55-76.
- De Mei M. & Di Mauro M. (2006) Study of some characteristics Mediterranean vegetation species best suited for renaturalizition of terminal-phase municipal solid waste (MSW) landfills in Puglia (Southern Italy). Acta Œcologica 30, 78-87.
- Deshayes M., Guyon D., Jeanjean H., Stach N., Jolly A., Hagolle O. (2006) The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. Annals of Forest Science 63, 579-595.
- Desprez-Loustau M.L., Marcais B., Nageleisen L.M., Piou D., Vanini A. (2006) Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. Annals of Forest Science 63, 595-610.
- Donovan L.A., Grisé D.J., West J.B., Pappert R.A., Alder N.N., Richards J.H. (1999) Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert shrubs. Oecologia 120, 209-217.
- Duchemin B., Guyon J., Courrier G. (1999) Monitoring phenological key-stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA-AVHRR data. Remote Sensing of Environment 67, 68-82.
- Ellenberg H. (1974) Zeigerwerte der Gefässpflanzen Mitteleuropas. Scripta Geobotanica 9, 9-166.
- Ersa (2006) Suoli e paesaggi del Friuli Venezia Giulia, 2. Provincie di Gorizia e Trieste. ERSA - Agenzia regionale per lo sviluppo rurale, Servizio ricerca e sperimentazione, Pozzuolo del Friuli (UD).
- Fanelli G. (2002) Analisi fitosociologica dell'area metropolitana di Roma. Braun-Blanquetia 27, 1-272.

- Farina A. (2001) Ecologia del paesaggio. Principi, metodi e applicazioni. Utet, Torino.
- Farquhar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. (1982) On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Australian Journal of Plant Physiology 9, 121-137.
- Farquhar G.D. & Richards R.A. (1984) Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. Australian Journal of Plant Physiology 11, 539-552.
- Fay P., Carlisle J., Knapp A., Blair J., Collins S. (2000) Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: design and performance of rainfall manipulation shelters. Ecosystems 3, 308-319.
- Feoli E., Giacomich P., Mignozzi K., Oztürk M., Scimone M. (2003) Monitoring desertification risk with an index integrating climatic and remotely-sensed data: an example from the coastal area of Turkey. Management of Environmental Quality: An International Journal, vol. 14, p. 1.
- Feoli E. & Ganis P. (2005) Introduzione all'ecologia quantitativa. Dispensa per gli insegnamenti di ecologia ed ecologia quantitativa per i Corsi di Laurea in Scienze Naturali, Biologia e Scienze Ambientali, A.A. 2004-2005. Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Trieste.
- Fernandez-Illescas C.P., Porporato A., Laio F. (2001) The ecohydrological role of soil texture in a water-limited ecosystem. Water Resources Research 37, 2863-2872.
- Fink A., Brucher T., Kruger A., Leckebush G., Pinto J., Ulbrich U. (2004) The 2003 European summer heatweaves and drought – synoptic diagnosis and impacts. Weather 59, 2009-2216.
- Forti F. (1972) Proposta di una scala di carsificabilità epigea nelle carbonatiti calcaree del Carso triestino. Atti Museo civico Storia Naturale Trieste 28, 67-100.

- Forti F., Stefanini S., Ulcigrai F. (1975) Relazioni tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del Carso Triestino. Atti e Memorie Commissione Grotte "E. Boegan", vol. 14, 19-49.
- Forti F. (1982) Carso triestino. Guida alla scoperta dei fenomeni carsici. Edizioni Lint, Trieste.
- Frelich L.E. & Reich P.B. (1999) Neighborhood effects, disturbance severity, and community stability in forests. Ecosystems 2, 151-166.
- Ganis P. (1991) La diversità specifica nelle comunità ecologiche: concetti, metodi e programmi di controllo. Quaderni del Gruppo di Elaborazione Automatica Dati Ecologia Quantitativa. Dipartimento di Biologia, Università di Trieste, C.E.T.A. (International Center for Theoretical and Applied Ecology). GEAD-EQ n.10.
- Gao B.C. (1996) NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58, 257-266.
- Gobron N., Pinty B., Verstraete M.M., Govaerts Y. (1999) The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. International Journal of Remote Sensing 20, 1917-1927.
- Gobron N., Mélin F., Pinty B., Verstraete M.M., Widlowsky J.L., Bucini G. (2001) A Global Vegetation Index for SeaWiFS: Design and Applications, in Beniston M, Verstraete M.M. (Eds.) Satellite remote sensing data and climate model simulations: synergies and limitations. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Gobron N., Pinty B., Mélin F., Taberner M., Verstraete M.M., Belward A., Lavergne T. Widlowsky J.L. (2005) The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. International Journal of Remote Sensing 26, 2013-2020.
- Grassi F., Labra M., Sala F. (2006) Introduzione alla biodiversità del mondo vegetale. Piccin Nuova Libraria S.p.A., Padova.

- Guicherd P., Peltier J.P., Gout E., Bligny R. (1997) Osmotic adjustment in *Fraxinus excelsior* L.: malate and mannitol accumulation in leaves under drought conditions. Trees 11, 155-161.
- Gutschick V.P. & BassiriRad H. (2003) Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences. The New Phytologist 160, 21-42.
- Hacke U.G. & Sperry J.S. (2001) Functional and ecological xylem anatomy. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 4, 97-115.
- Haddad N.M., Tilman D., Knops J.M.H. (2002) Long-term oscillations in grassland productivity induced by drought. Ecology Letters 5, 110-120.
- Hagolle O., Lobo A., Maisongrande P., Cabot F., Duchemin B., De Pereyra A. (2005) Quality assessment and improvement of temporally composed products of remotely sensed imagery by combination of VEGETATION 1 & 2 images. Remote Sensing of Environment 94, 172-186.
- Holben B.N. (1986) Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing 7, 1435-1445.
- Holbrook N.M. & Zwieniecki M.A. (1999) Embolism repair and xylem tension: do we need a miracle? Plant Physiology 120, 7-10.
- Huete A.R. (1987) Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectra. In C. Elachi (Ed.) Introduction to the physics and techniques of remote sensing, 107-141. Wiley-Interscience, New York.
- IPCC (2001) Climate change 2001: the scientific basis. http://www.ipcc.ch/
- Jarvis A. & Davies W.J. (1998) The coupled response of stomatal conductance to photosynthesis and transpiration. Journal of Experimental Botany 49, 399-406.
- Jolly A., Guyon D., Riom J. (1996) Use of Landsat Thematic Mapper middle infrared data to detect clearcuts in the Landes region. International Journal of Remote Sensing 17, 3615-3645
- Jones H.G. & Sutherland R.A. (1991) Stomatal control of xylem embolism. Plant, Cell and Environment 18, 189-196.

- Kim H., Huete A.R., Emmerich B., Nagler P., Glenn E. (2004) Drought and water content analysis of semiarid riparian and upland vegetation communities with remotely sensed data and eddy-flux measurements. Poster USDA http://www.tucson.ars.ag.gov/rise/2004/Posters/KimPoster.pdf
- Kogan F.N. (1995) Drought of the late 1980s in the US as derived from NOAA polar orbiting satellite data. Bullettin of the American Meteorological Society 76, 665-667.
- Kolb K.J., Sperry J.S., Lamont B.B. (1996) A method for measuring xylem conductance and embolism in entire root and shoot systems. Journal of Experimental Botany 47, 1805-1810.
- Landolt E. (1977) Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Geobotanisch Institut ETH Zurich 64, 64-207.
- Levitt J. (1980) Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York.
- Lillesaeter O. (1982) Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. Remote Sensing of Environment 12, 247-254.
- Lillesand T.M. & Kiefer R.W. (1994) Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, New York.
- Lloret F., Siscart D., Dalmases C. (2004) Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). Global Change Biology 10, 2092-2099.
- Lo Gullo M.A. & Salleo S. (1988) Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. The New Phytologist 108, 267-276.
- Lo Gullo M.A., Nardini A., Salleo S., Tyree M.T. (1998) Changes in root hydraulic conductance (KR) of *Olea oleaster* Hoffmgg. Et Link seedlings following drought stress and irrigation. The New Phytologist 140, 25-31.

- MacGillivray C.W., Grime J.P., Band S.R., Booth R., Campbell B., Hendry G., Hillier S., Hodgson J., Hunt R., Jalili A., Mackey J., Mowfort M., Neal A., Reader R., Rorison I., Spencer R., Thompson K., Thorpe P.C. (1995) Testing predictions of the resistance and resilience of vegetation subjected to extreme events. Functional Ecology 9, 640-649.
- Marigo G. & Peltier J.P. (1996) Analysis of the diurnal change in osmotic potential in leaves of *Fraxinus excelsior* L. Journal of Experimental Botany 47, 763-769.
- Martinez-Vilalta J., Pinol J., Beven K. (2002) A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. Ecological Modelling 155, 127-147.
- Maselli F. (2004) Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multilayer NDVI data. Remote Sensing of Environment 89, 423-433.
- Medrano H., Escalona J.M., Bota J., Gulías J., Flexas J. (2002) Regulation of photosynthesis of C_3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. Annals of Botany 89, 895-905.
- Meinzer F.C. (2002) Co-ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants. Plant, Cell and Environment 25, 265-274.
- Meusel H., Jäger E., Rauschert S., Weinert E. (1978) Vergleichende Chorologie der Zentraleuropäischen Flora. 2. Karten pp 346, Veb Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Milburn J.A., Tyree M.T., Lo Gullo M.A., Salleo S. (1980) The physiology of sap transport in the genus *Fraxinus*. Proceedings of the European Society of Plant Physiology, 510-511.
- Mishio M. & Yokoi Y. (1991) A model for estimation of water flow resistance in soil-leaf pathway under dynamic conditions. Journal of Experimental Botany 42, 541-546.

- Mueller R.C., Scudder C.M., Porter M.E., Trotter III R.T., Gahring C.A., Whitham T.G. (2005) Differential tree mortality in response to severe drought: evidence for long-term vegetation shifts. Journal of Ecology 93, 1085-1093.
- Nardini A. & Pitt F. (1999) Drought resistance of *Quercus pubescens* as a function of root hydraulic conductance, xylem embolism and hydraulic architecture. The New Phytologist 143, 485-493.
- Nardini A. & Tyree M.T. (1999) Root and shoot hydraulic conductance of seven *Quercus* species. Annals of Forest Science 56, 371-377.
- Nardini A., Lo Gullo M.A., Salleo S. (1999) Competitive strategies for water availability in two Mediterranean *Quercus* species. Plant, Cell and Environment 22, 109-116.
- Nardini A. & Salleo S. (2000) Limitation of stomatal conductance by hydraulic traits: sensing or preventing xylem cavitation? Trees 15, 14-24.
- Nardini A., Tyree M.T., Salleo S. (2001) Xylem cavitation in the leaf of *Prunus laurocerasus* and its impact on leaf hydraulics. Plant Physiology 125, 1700-1709.
- Nardini A., Salleo S., Trifilò P., Lo Gullo M.A. (2003a) Water relations and hydraulic characteristics of three woody species co-occurring in the same habitat. Annals of Forest Science 60, 297-305.
- Nardini A., Salleo S., Raimondo F. (2003b) Changes in leaf hydraulic conductance correlate with leaf vein embolism in *Cercis siliquastrum* L. Tree, Structure and function 17, 529-534.
- Nardini A. & Salleo S. (2005) Water stress-induced modifications of leaf hydraulic architecture in sunflower: co-ordination with leaf gas exchange. Journal of Experimental Botany 56, 3093-3101.
- Nijsse J. (2004) On the mechanism of xylem vessel length regulation. Plant Physiology 134, 32-34.
- Nilsen E.T. & Orcutt D.M. (1996) The physiology of plants under stress. John Wiley & Sons, New York.

- Oddo E., Sajeva M., Bellini E. (2002a) Seasonal pattern of mannitol and malate accumulation in leaves of two manna ash species (*Fraxinus ornus* L. and *F. angustifolia* Vahl) growing in Sicily. Plant Biosystems 136, 29-34.
- Oddo E., Saiano F., Alonzo G., Bellini E. (2002b) An investigation of the seasonal pattern of mannitol content in deciduous and evergreen species in the Oleaceae growing northern Sicily. Annals of Botany 90, 239-243.
- Pal J.S., Giorgi F., Bi X.Q. (2004) Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. Geophysical Research Letters 31, L13202.
- Pattonier M.P., Peltier J.P., Marigo G. (1999) Drought-induced increase in xylem malate and mannitol concentrations and closure of *Fraxinus excelsior* L. stomata. Journal of Experimental Botany 50, 1223-1229.
- Peltier J.P., Marigo D., Marigo G. (1997) Involvement of malate and mannitol in the diurnal regulation of the water status in members of Oleaceae. Trees 12, 27-34.
- Pereira J.M.C. & Govaerts Y. (2001) Potential Fire Applications from MSG/SEVIRI Observations. EUMETSAT Programme Development Department Technical Memorandum No. 07.
- Peterken G.F. & Mountford E.P. (1996) Effects of drought on beech in Lady Park Wood, an unmanaged mixed deciduous woodland. Forestry 69, 125-136.
- Pignatti S. (1952) Introduzione allo studio fisiologico della pianura veneta orientale con particolare riguardo alla vegetazione litoranea. Archivio Botanico 28, 265-329.
- Pignatti S. (1982) Flora d'Italia. Ed. Agricole (Bo), vol. 2, 322-323.
- Pignatti S., Menegoni P., Pietrosanti S. (2005) - Bioindicazione attraverso le piante vascolari. Valori di indicazione secondo Ellenberg (Zeigerwerte) per le piante della flora d’Italia. Braun-Blanquetia 39, Camerino.
- Pockman W.T. & Sperry J.S. (2000) Vulnerability to xylem cavitation and the distribution of Sonoran desert vegetation. American Journal of Botany 87, 1287-1299.

- Poldini L., Gioitti G., Martini F., Budin S. (1980) Introduzione alla flora e alla vegetazione del Carso. Edizioni Lint, Trieste.
- Poldini L. (1989) La vegetazione del Carso isontino e triestino. Studio del paesaggio vegetale fra Trieste, Gorizia e i territori adiacenti. Edizioni Lint, Trieste.
- Poldini L. (2002) Nuovo atlante corologico delle piante vascolari nel Friuli Venezia Giulia. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Azienda Parchi e Foreste regionali, Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Biologia, pp 211. Arti grafiche friulane, Udine.
- Poole D.K. & Miller P.C. (1975) Water relations of selected species of Chaparral and selected coastal sage communities. Ecology 56, 1118-1128.
- Pyšek P. (1998) Alien and native species in Central Europe urban floras: a quantitative comparison. Journal of Biogeography 25, 155-163.
- Radoglou K. & Raftoyannis Y. (2000) A comparative study of plant vitality tests and field performance of eleven tree species. Phyton (Austria) Special issue: “Root-soil interactions”, vol. 40, fasc. 4, 163-168.
- Radoglou K. & Raftoyannis Y. (2001) Effects of desiccation and freezing on vitality and field performance of broadleaved tree species. Annals of Forest Science 58, 59-68.
- Rebetez M. (2001) Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. Theorethical and Applied Climatololgy 69, 13-21.
- Rebetez M. & Dobbertin M. (2004) Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. Theorethical and Applied Climatololgy 79, 1-9.
- Rebetez M., Mayer H., Dupont O., Schnidler D., Gartner K., Kropp J., Menzel A. (2006) Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. Annals of Forest Science 63, 567-575.
- Renaud J.P. & Nageleisen L.M. (2005) Results from the European Network For Damage Monitoring. Département de la santé des forêts, Bilan de la santé des forêts en 2004, 2005.

- Rouault G., Candeau J.N., Lieutuer F., Martin J.C., Grégorie J.C., Nageleisen L.M., Landmann G. (2006) Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Annals of Forest Science 63, 611-622.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in: Freden S.C., Becker M. (Eds) Third earth resources technology satellite-1 symposium, NASA SP-352, Washington, DC, vol. 1, 309-317.
- Sack L., Cowan PD., Jaikumar N., Holbrook N.M. (2003) The “hydrology” of leaves: coordination of structure and function in temperate woody species. Plant, Cell and Environment 26, 1343-1356.
- Sack L. & Holbrook N.M. (2006) Leaf Hydraulics. Annual Review of Plant Biology 57, 61-81.
- Salleo S. (1983) Water relations parameters of two Sicilian species of *Senecio* (groundsel) measured by the pressure bomb technique. The New Phytologist 95, 179-188.
- Salleo S. & Lo Gullo M.A. (1985) Hydraulic architecture of plants in the Mediterranean environment. Annals of Botany 83, 83-100.
- Salleo S. & Lo Gullo M.A. (1990) Sclerophylly and plant water relations in three Mediterranean *Quercus* species. Annals of Botany 65, 259-270.
- Salleo S. (1995) Ecologia dell'acqua, in Pignatti S. ed.- Ecologia vegetale. UTET, Torino, 137-162.
- Salleo S., Lo Gullo M.A., De Paoli D., Zippo M. (1996) Xylem recovery from cavitation-induced embolism in young plants of *Laurus nobilis*: a possible mechanism. The New Pythologist 132, 47-56.
- Salleo S., Nardini A., Lo Gullo M.A. (1997) Is sclerophylly of Mediterranean evergreens an adaptation to drought? The New Phytologist 135, 603-612.
- Salleo S. & Nardini A. (2000) Sclerophylly: evolutionary advantage or mere epiphenomenon? Plant Biosystems 134, 247-259.

- Salleo S., Nardini A., Pitt F., Lo Gullo M.A. (2000) Xylem cavitation and hydraulic control of stomatal conductance in Laurel (Laurus nobilis L.). Plant, Cell and Environment 23, 71-79.
- Salleo S., Hamzé M., Jomaa I., Pitt F., Nardini A. (2002) Differential drought resistance of two Mediterranean oaks growing in the Bekaa Valley (Lebanon). Plant Biosystems 136, 91-100.
- Salleo S. & Nardini A. (2003) Some guidelines for monitoring desertification of Mediterranean drylands on the basis of plant water status. Methodological problems and results from the DEMOS project. Management of Environmental Quality vol. 14 No. 1, 39-50.
- Salleo S., Nardini A., Altobelli A., Giacomich P., Paladin M., Jodice R., Feoli E., Raimondo F. (2004) Integrating vineyards in agro-ecosystem management: linking remote sensing to eco-physiological measurements for a precision agriculture. Agroenviron 2004, Udine, Italy, 20-24 October 2004.
- Sano Y. (2004) Intervascular pitting across the annual ring boundary in *Betula platyphylla* var. *japonica* and *Fraxinus mandshurica* var. *japonica*. International Association of Wood Anatomists Journal 25, 129-140.
- Schaer C., Vidale P.L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatweaves. Nature 427, 332-336.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen E.A. (1965) Sap pressure in vascular plants. Science 148, 339-346.
- Shannon C.E. (1948) A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal 27, 379-423.
- Shi L.B., Guttenberger M., Kottke I., Hampp R. (2002) The effect of drought on mycorrhizas of beech (*Fagus sylvatica* L.): changes in community structure, and the content of carbohydrates and nitrogen storage bodies of the fungi. Mycorrhiza 12, 303-311.
- Speranza A. & Calzoni G.L. (1996) Struttura delle piante in immagini. Zanichelli Editore S.p.A., Bologna.

- Sperry J.S. & Tyree M.T. (1990) Water-stress-induced xylem embolism in three species of conifers. Plant, Cell and Environment 13, 427-436.
- Sperry J.S. (2000) Hydraulic constraints on plant gas exchange. Agricultural and Forest Meteorology 104, 13-23.
- Sperry J.S., Hacke U.G., Oren R., Comstock J.P. (2002) Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply. Plant Cell Environ. 25, 251-263.
- Sperry J., Hacke U.G., Wheeler J.K. (2005) Comparative analysis of end wall resistivity in xylem conduits. Plant, Cell and Environment 28, 456-465.
- Steudle E. (2000) Water uptake by roots: effects of water deficit. Journal of Experimental Botany 51, 1531-1542.
- Stirzaker R.J. & Passioura J.B. (1996) The water relations of the root-soil interface. Plant Cell Environ. 19, 201-208.
- Thomas F.M., Blank R., Hartmann G. (2002) Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. Forest Pathology 32, 277-307.
- Tretiach M. (1993) Photosynthesis and transpiration of evergreen Mediterranean and deciduous trees in an ecotone during a growing season. Acta Œcologica 4, 341-360.
- Trifilò P., Nardini A., Lo Gullo M.A., Salleo S. (2003) Vein cavitation and stomatal behaviour of sunflower (*Heliantus annuus*) leaves under water limitation. Physiologia Plantarum 119, 409-417.
- Trisorio Liuzzi G. & Ladisa G. (2001) Biodiversità: Monitoraggio e Indicatori Ambientali. Atti del seminario nazionale CTN_CON Centro Tematico Nazionale Conservazione della Natura, 22-23 ottobre 2001, Saint Vincent – Aosta.
- Tsuda M. & Tyree M.T. (2000) Plant hydraulic conductance measured by the high pressure flow meter in crops plants. Journal of Experimental Botany 51, 823-828.
- Tucker C.J. & Sellers P.J. (1986) Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing 7, 1395-1416.

- Tyree M.T. & Hammel H.T. (1972) The measurement of the turgor pressure and water relations of plants by the pressure-bomb technique. Journal of Experimental Botany 23, 267-282.
- Tyree M.T. & Sperry J.S. (1989) Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. Annual Review of Plant Physiology. Plant Molecular Biology 40, 19-38.
- Tyree M.T., Davis S.D., Cochard H. (1994) Biophysical perspectives of xylem evolution: is there a tradeoff of hydraulic efficency for vulnerability to disfunction? IAWA Journal 15, 335-160.
- Tyree M.T., Salleo S., Nardini A., Lo Gullo M.A., Mosca R. (1999) Refilling of embolized vesselsin young stems of laurel. Do we need a new paradigm? Plant Physiology 120, 11-21.
- Tyree M.T. & Zimmermann M.H. (2002) Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer, Berlin.
- Vertovec M., Sakçali S., Ozturk M., Salleo S., Giacomich P., Feoli E., Nardini A. (2001) Diagnosing plant water status as a tool for quantifying water stress on a regional basis in Mediterranean drylands. Annals of Forest Science 58, 113-125.
- Weber E.F. (1997) The alien flora of Europe: a taxonomical and biogeographic review. Journal of Vegetation Science 8, 565-572.
- Wyckoff P.H. & Clark J.S. (2002) The Relationship between growth and mortality for seven co-occurring tree species in the southern Appalachian Mountains. Journal of Ecology 90, 604-615.
- Xiao X., Boles S., Liu J.Y., Zhuang D.F., Liu M.L. (2002) Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. Remote Sensing of Environment 82, 335-348.
- Xiao X., Zhang Q., Braswell B., Urbanski S., Boles S., Wofsy S., Moore B. III, Ojima D. (2004) Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment 91, 256-270.

- Xiao X., Zhang Q., Saleska S., Hutyra L., De Camargo P., Wofsy S., Frolking S., Boles S., Keller M., Moore B. III (2005) Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. Remote sensing of Environment 94, 105-122.
- Zimmermann M.H. (1983) Xylem structure and the ascent of sap. Springer Verlag, New York.

Pagine Web:

- CEOS, Committee on Earth Observation Satellites
  http://www.ceos.org/pdfs/CEOS_brochure_Sep04E.pdf.2004
- OSMER FVG http://www.osmer.fvg.it